

Folge 2

Berichte aus der Forschung



Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik

**Zum Titelbild
(von oben nach unten):
Plasmagefäß der Fusions-
anlage ASDEX Upgrade,
Arbeiten für WENDELSTEIN
7-AS, Computerstudie für
WENDELSTEIN 7-X,
Testkryostat von WENDEL-
STEIN 7-X,
Hochfrequenzheizung an
ASDEX Upgrade,
Blick in das Plasma von
ASDEX Upgrade.
(Fotos: IPP, Peter Ginter)**

Vorwort



Energieforschung ist Zukunftssicherung: Über neunzig Prozent des Weltenergiebedarfs wird heute aus fossilen Energiequellen gedeckt. Die gegenwärtige Versorgungssicherheit lässt leicht vergessen, dass drohende Klimaschäden und begrenzte Brennstoffvorräte auf längere Sicht einen Umbau unseres Energiesystems verlangen. Das Problem wird verschärft durch die schnell wachsende Erdbevölkerung und den global steigenden Energiebedarf. Um die Versorgung künftiger Generationen zu sichern, müssen deshalb alle Alternativen untersucht werden, die Kohle, Erdöl und Erdgas ersetzen können. Die Auswahl an ergiebigen Energiequellen ist jedoch begrenzt: Neben Kernspaltung und Sonnenenergie bleibt als dritte Möglichkeit die Fusion.

Ziel der Fusionsforschung ist die Gewinnung der Energie, die bei der Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Helium frei wird. Zum Zünden des Fusionsfeuers muss der Brennstoff - ein Wasserstoff-Plasma - in Magnetfeldern eingeschlossen und auf hohe Temperaturen aufgeheizt werden. Da die für den Fusionsprozess nötigen Grundstoffe in nahezu unbegrenzter Menge vorhanden und über die ganze Welt verteilt sind, könnte die Kernfusion einen nachhaltigen Beitrag zur Energieversorgung der Zukunft leisten. Die Fusionsforschung hat sich seit ihren An-

fängen in den 50er Jahren in kontinuierlicher Detailarbeit auf ihr anspruchsvolles Ziel zu bewegt. Inzwischen können die ehemals kritischen Probleme - die Heizung, Wärmeisolation und Reinhaltung des Plasmas sowie die Energieauskopplung - als gelöst gelten. Es ist gelungen, Fusionsleistungen von mehreren Megawatt freizusetzen. Diese Ergebnisse erlauben die Planung eines Testreaktors, der erstmals ein für längere Zeit energielieferndes Plasma erzeugen soll.

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching und Greifswald ist eines der großen Zentren für Fusionsforschung in Europa und beschäftigt sich mit den physikalischen Grundlagen der Kernverschmelzung. Die vorliegenden „Berichte aus der Forschung“ wollen in allgemeinverständlicher Form einen Einblick in Grundlagen sowie aktuelle Themen der Fusionsforschung geben, wie sie im IPP untersucht werden. Aufbauend auf einer Einführung in die physikalischen und technischen Grundlagen und die historische Entwicklung werden der gegenwärtige Stand des Wissens ebenso wie noch offene Fragen dargestellt. Darüber hinaus vermitteln die Berichte einen Eindruck von den vielfältigen physikalischen, technischen, handwerklichen und verwaltungstechnischen Disziplinen, die zur Organisation des Forschungsprozesses zusammenwirken.



Foto: Max Prügger

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik auf dem Forschungsgelände Garching.



Foto: Ferzi Baur

Das IPP-Teilinstitut in Greifswald

IMPRESSUM

Kernfusion - Berichte aus der Forschung
Folge 2

Herausgeber:

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)
Boltzmannstraße 2
85748 Garching bei München
Telefon 089-3299-01
info@ipp.mpg.de
www.ipp.mpg.de

Redaktion: Isabella Milch

Gestaltung: Dagmar Aalden

Grafik: Karin Hirl, Monika Treske

Druck: Steinmeier, Nördlingen

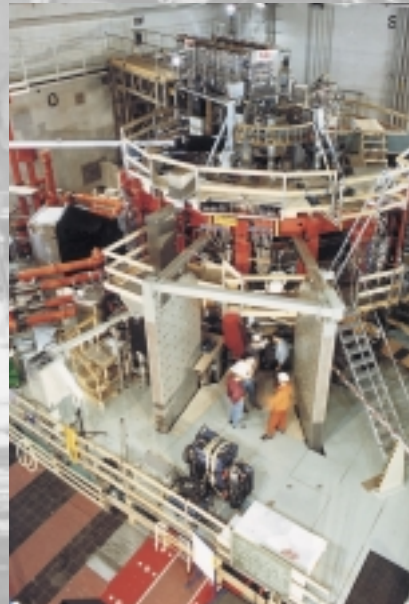
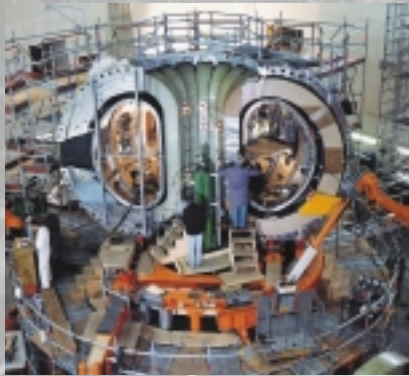
Copyright 2002 Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik, Garching und Greifswald
ISSN 0172-8482

Inhalt



Vorwort	3
Einführung in die Fusionsforschung	7
Grundlagen der Kernfusion	8
Experimenttypen	15
Elemente der Fusionsexperimente	19
Das Fusionskraftwerk	29
Kernfusion - eine internationale Gemeinschaftsaufgabe	37
Fusionsforschung im IPP	43
Tokamak-Experimente	44
Stellarator-Experimente	55
Allgemeine Arbeiten zur Fusion	67
Kooperationen	82
Wissenschaftliche Infrastruktur	88
Anhang	93
Verwaltung und Allgemeine Dienste	94
Stabsstellen der Geschäftsführung	95
Wissenschaftlich-Technisches Büro	95
Organisatorischer Aufbau des IPP	100
Literaturhinweise	103
Wegweiser	104

Einführung Fusions- forschung



Grundlagen der Kernfusion

Fusionsreaktionen

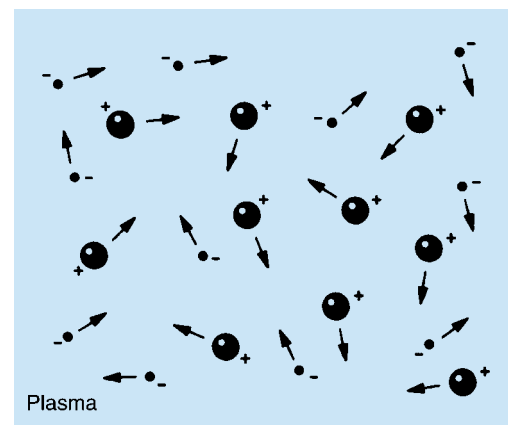
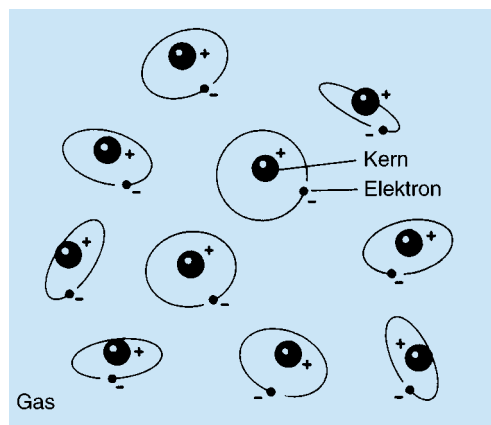
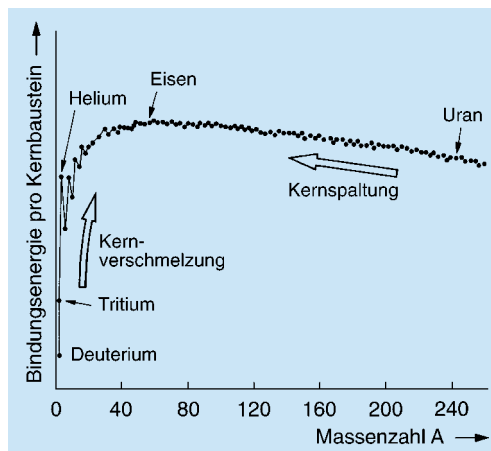
Quelle der Fusionsenergie ist die innere Bindungsenergie der Atomkerne. Die Kernbausteine sind von einer Atomsorte zur anderen verschieden stark aneinander gebunden. Je fester sie verbunden sind, desto mehr Energie muss aufgewandt werden, den Kern zu spalten. Umgekehrt wird umso mehr Energie frei, wenn 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 -

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

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.



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.

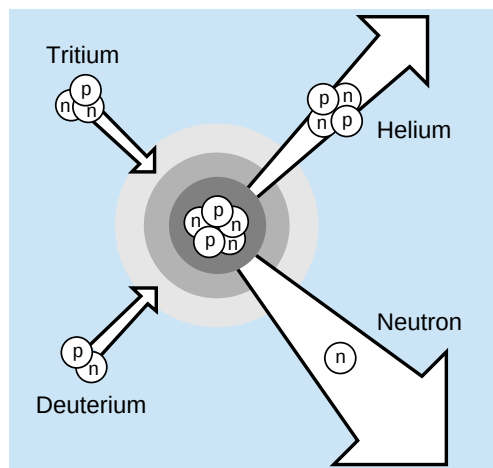
Von allen möglichen Paaren leichter Atomkerne, die verschmelzen können, liefert die Reaktion zwischen den beiden schweren Varianten des Wasserstoffs - Deuterium und Tritium - die größte Energieausbeute bei der niedrigsten Plasmatemperatur. Je ein Deuterium- und Tritiumkern verschmelzen dabei zu einem 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	

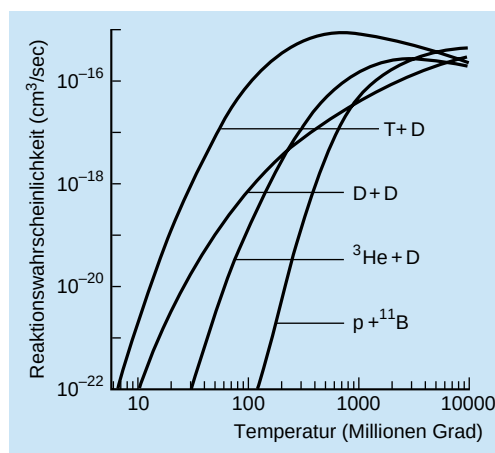
Verschiedene Fusionsreaktionen. Das für die Deuterium-Tritium-Fusion nötige Tritium kann im Kraftwerk durch die Fusionsneutronen aus Lithium erzeugt werden.

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



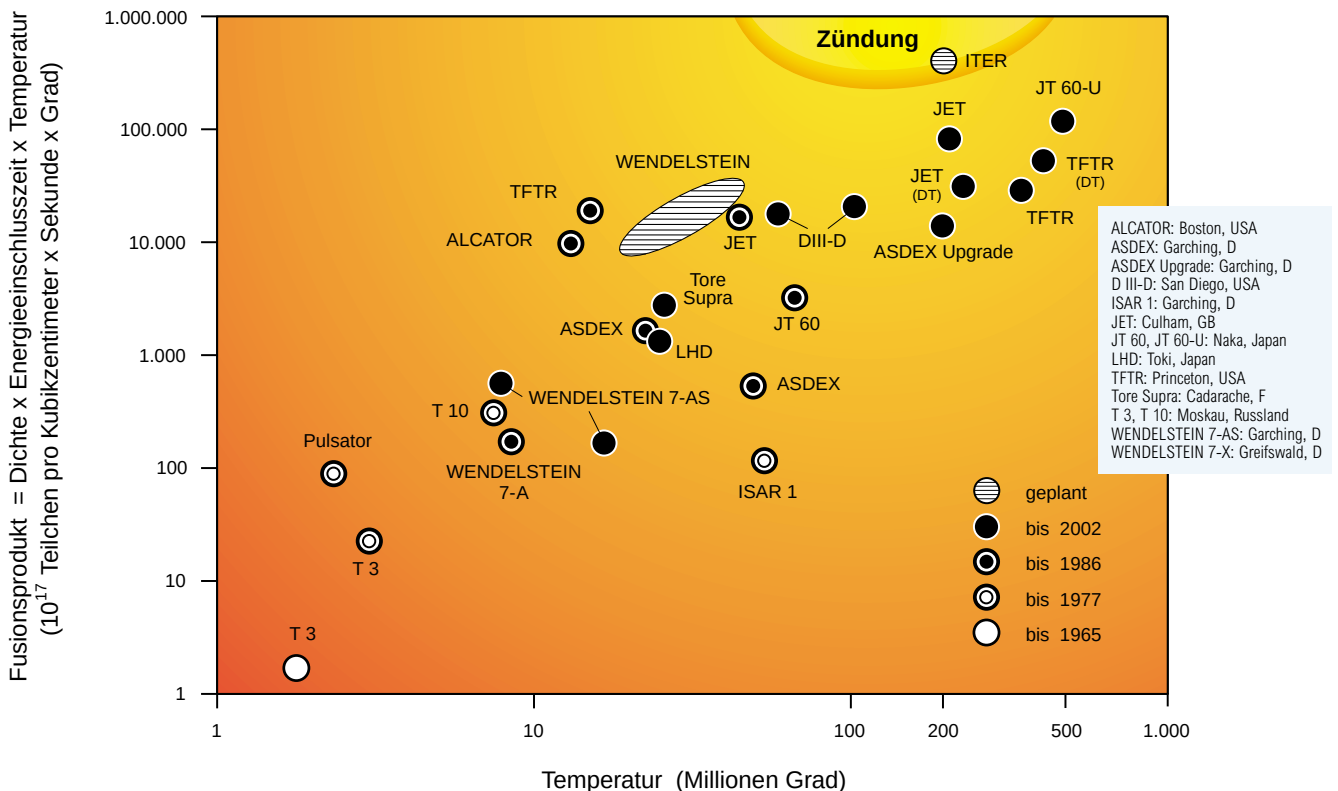
Beim Zusammenstoß eines Deuterium- und eines Tritiumkerns bildet sich über einen heliumartigen Zwischenkern ein Heliumkern und ein Neutron. Beide Reaktionsprodukte besitzen hohe Bewegungsenergie, die zur Plasmaheizung und zur Energieproduktion im Kraftwerk genutzt werden kann.



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-

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.



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 Experimentaltreaktor 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

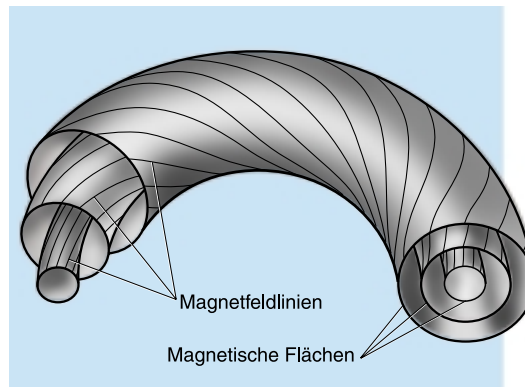
Zündbedingungen für ein Deuterium-Tritium-Plasma.

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.

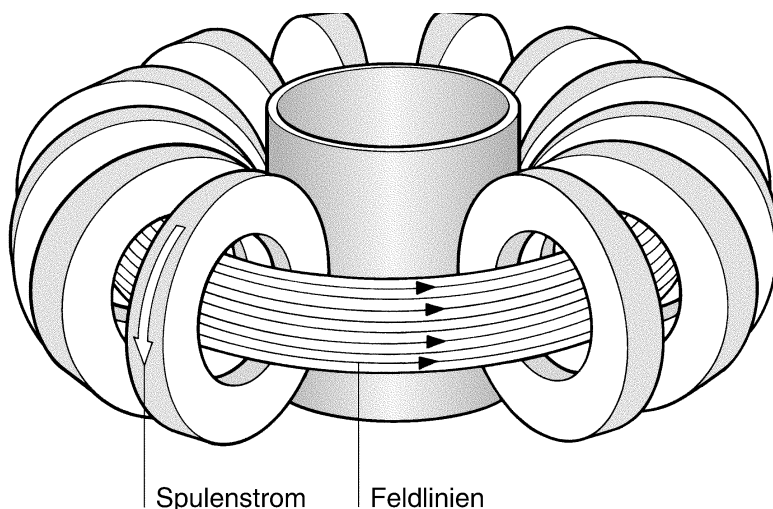
Die umlaufenden Feldlinien spannen dabei sogenannte „**magnetische Flächen**“ auf, die man sich wie die ineinander liegenden Jahresringflächen in einem Baumstamm vorstellen kann. Feldlinien, die in einem „Jahresring“ starten, behalten während ihres schraubenförmigen Umlaufs um die Seele des Torus „ihren“ 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 - die zentrale Ringlinie - 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

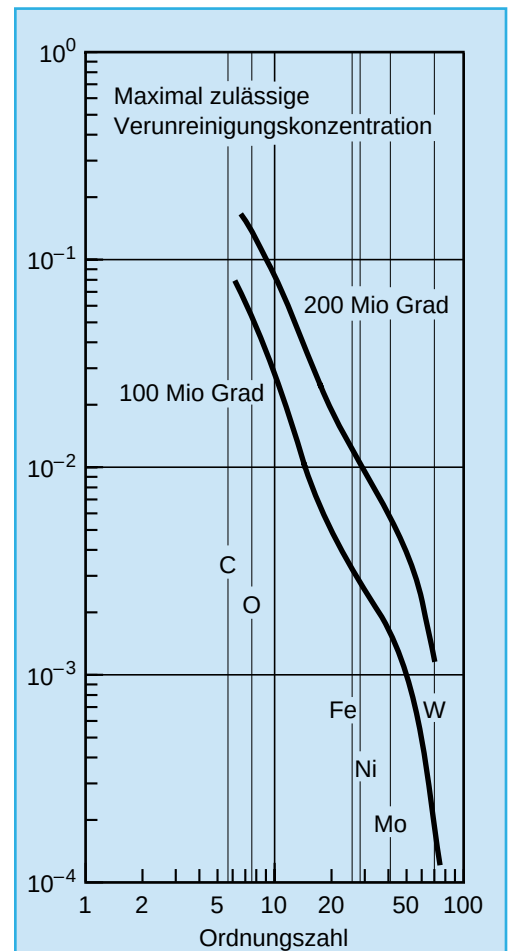
Stöße der Ionen im Plasma untereinander sind eine wichtige Voraussetzung für die Fusion: Nur bei einem Zusammenstoß zweier Ionen kann eine Verschmelzung stattfinden. Die allermeisten Stöße führen allerdings nicht zur Fusion, sondern nur zu einer Änderung von Richtung und Geschwindigkeit der aufeinanderprallenden 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



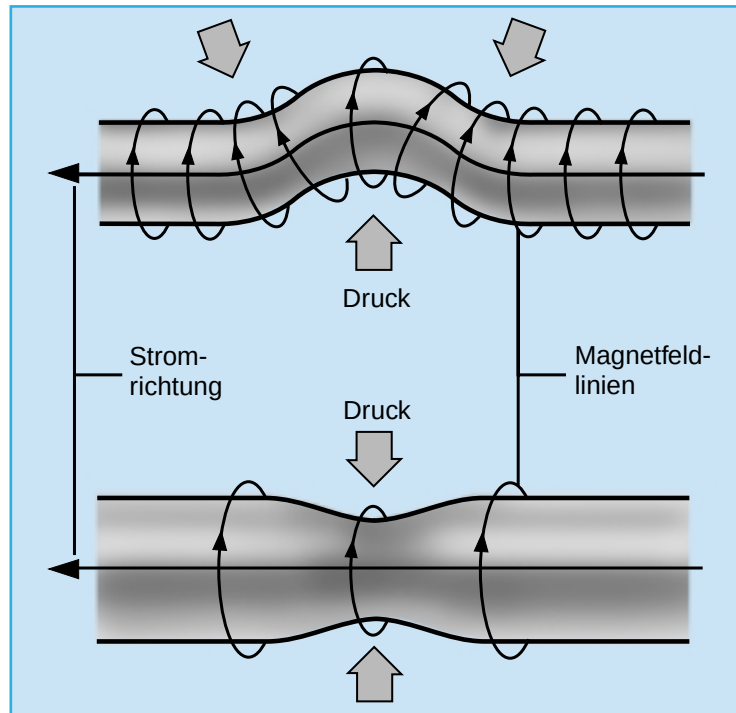
Die für die Zündung und das Brennen eines Fusionsplasmas maximal zulässigen Konzentrationen verschiedener Verunreinigungen. Je höher die Ordnungszahl der Elemente, desto niedriger muss ihre Konzentration im Plasma sein.

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

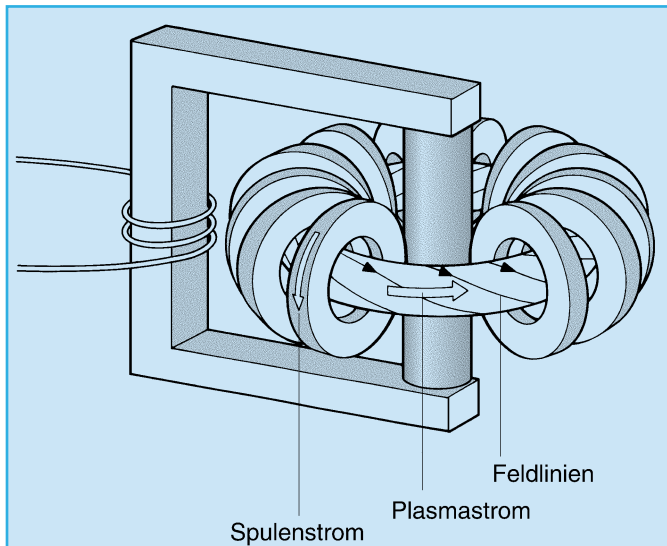
Bis zur Zündung muss das Plasma von außen geheizt werden. Dafür stehen mehrere Methoden zur Verfügung.

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.

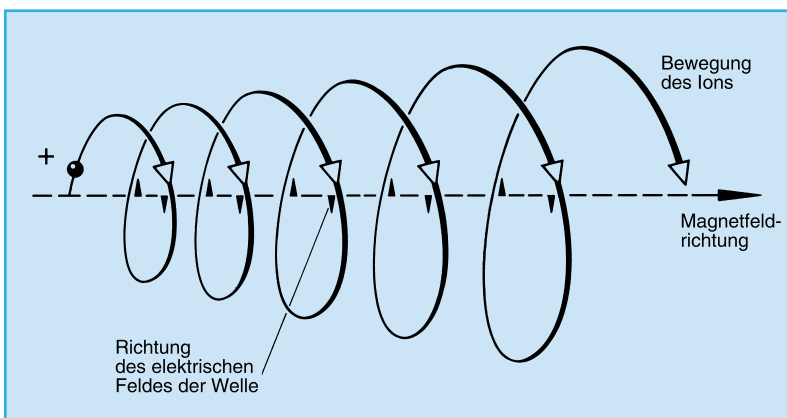


Stromheizung:
Ein relativ kleiner Strom, der in vielen Windungen um den Eisenkern eines Transformators geführt wird, kann in der „Sekundärwicklung“, dem Plasmaring, einen großen Strom treiben.

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

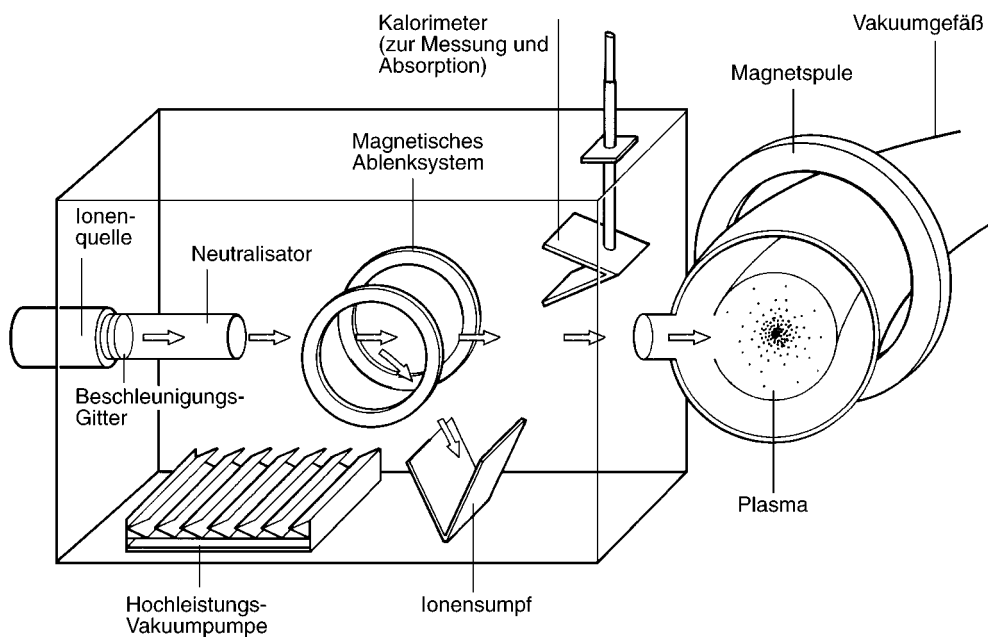
Die Neutralteilcheninjektion ist ein seit vielen Jahren bewährtes Verfahren, um Energie und Teilchen in Plasmen einzukoppeln. Teilchen hoher Bewegungsenergie, die in das Plasma hinein geschossen werden, geben über Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen ab und heizen sie auf (Abbildung rechts): In dem 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

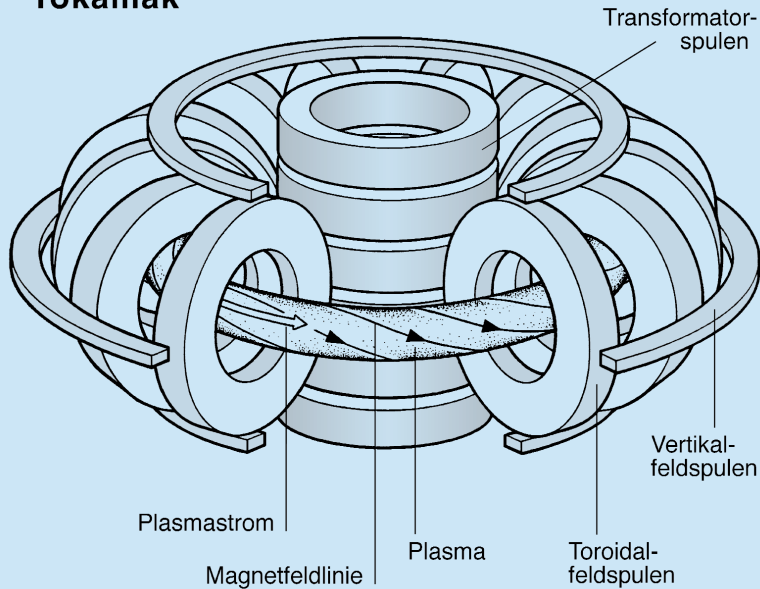
wird die zum Einschluss des Plasmas nötige Verdrillung der Feldlinien und der Aufbau magnetischer Flächen erreicht.

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-

Tokamak



Die Skizze eines Tokamaks zeigt die Transformator-, Toroidal- und Vertikalfeldspulen sowie den Plasma-Strom, die zusammen das Magnetfeldsystem eines Tokamaks erzeugen.

formators-pule induziert, die in der Achse des Torus angeordnet ist. Wegen des Transformators arbeitet ein Tokamak nicht kontinuierlich, sondern gepulst: In einem Transformator kann nur für eine beschränkte Zeit ein ansteigender Strom in der Primärwicklung erzeugt und damit ein Strom im Plasma getrieben werden. Danach muss der Transformator „entladen“ und der Strom von neuem hochgefahren werden. Bei einem späteren Tokamak-Kraftwerk kann man sich Pulszeiten von etwa

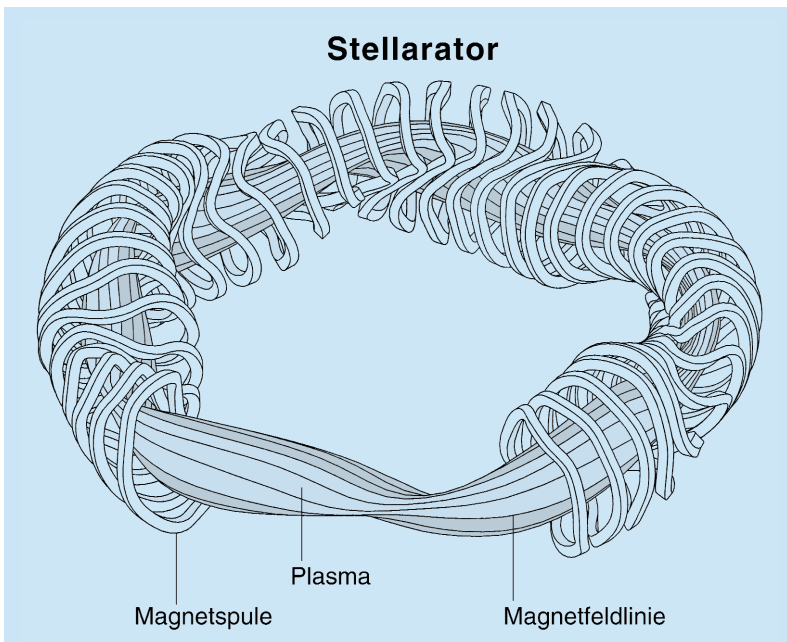
einer Stunde vorstellen. Da jedoch ein Kraftwerk aus technischen Gründen kaum gepulst betrieben werden darf, werden Methoden untersucht, einen kontinuierlichen Strom - zum Beispiel durch Hochfrequenzwellen oder den sogenannten „Bootstrap-Strom“, der durch Druckunterschiede im Plasma entsteht - zu erzeugen.

Der Stellarator

Stellaratoren können - anders als Tokamaks - von vornherein im Dauerbetrieb arbeiten: In einem Stellarator wird die schraubenförmige Verdrillung der Feldlinien um die Torus-Seele ausschließlich durch äußere Spulen erzeugt. Ein Stellarator kommt also ohne einen Längsstrom im Plasma und damit ohne Transformator aus. Er kann daher im Prinzip stationär arbeiten. Stromgetriebene Instabilitäten (Plasmaabbrüche) können nicht auftreten und auch ein Vertikalfeld - wie beim Tokamak - zur Lageregelung des Plasma-Stroms ist nicht nötig. In einem Stellarator wird der magnetische Käfig durch ein einziges Spulensystem erzeugt. Der Verzicht auf den ringförmigen Plasma-Strom bedeutet jedoch die Aufgabe der bei den Tokamaks vorhandenen Axialsymmetrie; Plasma und Magnet-spulen besitzen eine kompliziertere Form. Durch die Aufgabe der Axialsymmetrie gewinnt man aber auch zusätzliche Freiheiten, das Magnetfeld zu formen und damit seine Eigenschaften zu optimieren. Für ein Fusionskraftwerk könnten Stellaratoren eine technisch einfachere Lösung sein als Tokamaks. Auf theoretischem Wege ist diese Frage nicht zu beantworten, sie experimentell zu entscheiden, ist das Ziel der WENDELSTEIN-Experimente des IPP.

Auch das Magnetfeld des Stellarators besitzt magnetische Flächen und kann mit und ohne Verschönerung erzeugt werden. Die sogenannte „Rotationstransformation“ gibt an, wie oft sich eine Feldlinie bei einem Umlauf im Gefäß um die Seele gedreht hat. Ist dies eine rationale Zahl, bedeutet dies, dass die Feldlinie wieder in sich zurückläuft. Beispielsweise bedeutet eine Rotationstransformation von $1/3$, dass die Feldlinie nach drei Umläufen um den Torus in sich zurückläuft. Ist die Rotationstransformation nicht rational, laufen die Feldlinien beliebig oft auf ihrer magnetischen Fläche um, ohne jemals wieder an dieselbe Stelle im Torus zu kommen. In

Stellarator



Die schematische Skizze eines Stellarators zeigt ein System aus nicht-ebenen Einzelspulen. Ihre spezielle Form bewirkt die Drehung der Feldlinien um die Seele, ohne dass ein Strom im Plasma fließen muss.

einem Magnetfeld ohne Verscherung hätten alle Feldlinien die gleiche Rotationstransformation und schlossen sich bei einem rationalen Wert nach der gleichen Zahl von Umläufen mit sich selbst.

Es zeigt sich, dass der Plasmaeinschluss stark von der Rotationstransformation des Feldes abhängt. Gutes Einschlussverhalten stellt sich ein, wenn man niedrige rationale Werte der Rotationstransformation wie $1/2$, $1/3$, $2/3$, $1/4$, ... vermeidet. Wesentliche Beiträge zur Klarstellung dieses Sachverhaltes lieferten die WENDELSTEIN-Anlagen des IPP. Für Experimente dieser Art ist zum Beispiel der Stellarator WENDELSTEIN 7-AS mit zusätzlichen Toroidalfeldspulen ausgerüstet, mit denen die Feldverdrillung verändert werden kann.

Plasmaentladungen

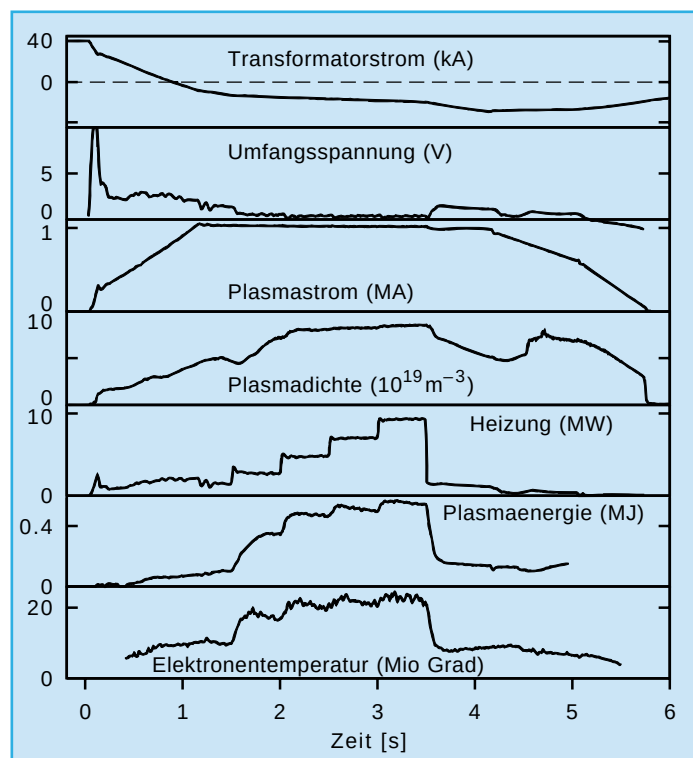
Die Fusionsexperimente in der gegenwärtigen Phase der plasmaphysikalischen Grundlagenforschung arbeiten mit kurzen Plasmaentladungen von 1 bis 20 Sekunden Dauer. Während dieser Zeit haben sich die wesentlichen Vorgänge im Plasma eingependelt, so dass ein weitgehend unveränderlicher Zustand erreicht ist. Längere Entladungen würden - wegen des hohen Stromverbrauchs der Magnetspulen - die Experimente unnötig verteuern. In einem späteren Tokamakkraftwerk rechnet man jedoch mit Entladungsdauern bis zu einer Stunde, ein Tokamak mit nicht-induktivem Stromtrieb bzw. ein Stellaratorkraftwerk würden im Dauerbetrieb arbeiten. Diese Anlagen werden dann aber supraleitende Magnetspulen besitzen, die wesentlich weniger Leistung verbrauchen als die heute überwiegend genutzten normalleitenden Kupferspulen.

Der Ablauf eines Experimentiertages orientiert sich an einem vorher festgelegten wissenschaftlichen Programm. Experimentleiter und technische Mannschaft sorgen zusammen mit den zurarbeitenden Gruppen für die Stromver-

sorgung, Plasmaheizung und Datenaufnahme dafür, dass die geplante Folge von Plasmaentladungen abgearbeitet wird. Die zahlreichen Physiker, die die Plasmadiagnostiken betreuen, sind für das Sammeln möglichst umfangreicher Daten verantwortlich, die zunächst zwischengespeichert werden. Die endgültige Archivierung und vor allem die Auswertung geschieht erst im Anschluss an die experimentelle Arbeit.

Ablauf einer Tokamakentladung

Der typische Ablauf einer Tokamakentladung im Experiment ASDEX Upgrade ist in der Abbildung unten dargestellt. Sie zeigt die zeitliche Entwicklung wichtiger physikalischer Größen - Transformatorstrom, Umfangsspannung, Plasmastrom, Plasmadichte, Plasmaheizung, Energieinhalt des Plasmas und Plasmatemperatur: Vor der Entladung herrscht im Plasmagefäß ein Hochvakuum von 10^{-8} Millibar. Durch Einschalten der Stromversorgungen wird zunächst das äußere Magnetfeld aufgebaut sowie der Strom in der Transformatorspule hochgefahren, die später im Plasma den Plasmastrom induzieren soll. Kurz vor Beginn der Entladung wird Wasserstoffgas in das Gefäß eingelassen, der Druck steigt auf einige 10^{-5} Millibar. Anschließend wird der Transformator entladen, d.h. der Strom langsam heruntergefahren. Die damit verbundene magnetische Flussänderung induziert eine Umfangsspannung von etwa zehn Volt, die



Ablauf einer typischen Entladung in einem Tokamak: Gezeigt ist die zeitliche Entwicklung von Transformatorstrom, Umfangsspannung, Plasmastrom, Plasmadichte, Plasmaheizung, Energieinhalt und Plasmatemperatur.



Kontrollraum der Fusionsanlage WENDELSTEIN 7-AS. Von hier aus wird der Ablauf der Experimente gesteuert.

die Entladung startet: Das Wasserstoffgas wird ionisiert und verwandelt sich in ein Plasma, das durch feedback-kontrollierte Regelung der Plasmalage, des Plasmaquerschnitts und des Plasmastromes aufgebaut wird. Der Stromaufbau geschieht langsam, um Instabilitäten zu vermeiden. Angepasst an den Stromanstieg wird auch die Plasmadichte durch Gaseinlass von außen auf den gewünschten Wert gebracht. An die Phase des Stromaufbaus schließt sich die Plateauphase mit konstantem Plasmastrom an, in der mit Beginn der Plasmaheizung die eigentlichen Experimente ablaufen.

Das Ende der Entladung ist i.a. bestimmt

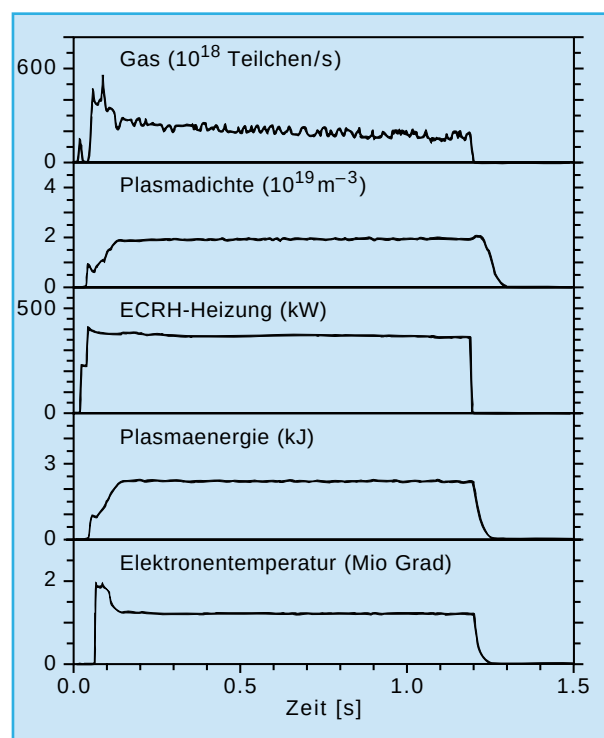
durch den Transformator, der den Plasmastrom erzeugt. Ist dort das Stromminimum erreicht - in der Abbildung nach vier Sekunden - dann ist keine weitere Flussänderung mehr möglich: der Strom im Plasma wird heruntergefahren. In der Wartezeit zwischen zwei Entladungen - rund zehn Minuten - werden die stromliefernden Generatoren wieder aufgeladen.

Ablauf einer Stellaratorentladung

In einer Stellaratorentladung (siehe Abbildung unten) wird zunächst - durch Einschalten des Spulenstroms - das Magnetfeld aufgebaut, das seine Einschlusseigenschaften bereits ohne Plasma besitzt. Wie beim Tokamak wird kurz vor der Entladung Wasserstoffgas in das leere Gefäß eingelassen. Das Plasma wird jedoch nicht durch Induktion einer Umfangsspannung und daraus folgendem Plasmastrom erzeugt, sondern durch Einstrahlung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen. Die Hochfrequenzwellen beschleunigen und heizen die Elektronen im Wasserstoffgas bzw. im entstehenden Plasma, die dann durch Stöße das Gas vollständig ionisieren.

Da im Unterschied zum Tokamak der langsame und kontrollierte Stromaufbau entfällt, bestimmt nur der Dichteaufbau die Anfangsphase der Entladung, so dass rasch die für die Plasmaexperimente entscheidende Plateauphase erreicht wird. Zur Regelung ist lediglich auf die richtige Gas-Nachfüllrate zu achten, um die Plasmadichte stabil zu halten. Um kleine, vom Plasma selbst erzeugte Ströme - den sogenannten „Bootstrap-Strom“ - zu kompensieren, benutzen einige Stellaratoren, zum Beispiel auch WENDELSTEIN 7-AS, noch einen Transformator. Vollständig optimierte Anlagen wie WENDELSTEIN 7-X können jedoch auf diese Steuerung verzichten. Allein die Dauer der Heizung bestimmt das Ende der Entladung, was im Prinzip den Dauerbetrieb möglich macht.

Typische Stellarator-Entladung: Gezeigt ist die zeitliche Entwicklung von Gasfüllung, Plasmadichte, Plasmaheizung, Energieinhalt und Plasmatemperatur. Ein Plasmastrom ist nicht notwendig.



Elemente der Fusionsexperimente

Plasmagefäß

Obwohl das Plasma durch ein Magnetfeld eingeschlossen wird, muss es in einem Gefäß erzeugt werden, das sowohl das Eindringen von Luft als auch das Austreten des Brennstoffs - Wasserstoff und Deuterium, später das radioaktive Tritium - verhindert. Schon geringe Mengen eindringender Luft würden ein brennendes Plasma sofort zum Erlöschen bringen. Ein Fusionskraftwerk ist auch aus diesem Grund inhärent sicher gegen ein „Durchbrennen“ bei einem Schadensfall. Das Gefäß muss vakuumdicht sein und auf einen Druck unter 10^{-8} Millibar - also Ultrahochvakuum - ausgepumpt werden können. Das ist nur möglich, wenn für das Gefäß ausschließlich Materialien mit niedrigem Dampfdruck verwendet werden, die auch bei hohen Temperaturen von 100 bis 300 Grad ausgeheizt werden können.

Da für die Experimente im IPP kein Tritium benötigt wird, müssen hier keine Vorkehrungen gegen das Entweichen von Tritium

getroffen werden. Anders ist dies bei Experimenten wie JET, das bereits mit Tritium experimentiert, oder dem geplanten Testreaktor ITER, der mit einem brennenden Deuterium-Tritium-Plasma arbeiten wird. Hier werden an das Gefäß besondere Anforderungen gestellt, zum Beispiel Doppelwandigkeit.

Damit bei einem Tokamak der Transformator den Strom im Plasma und nicht in der Gefäßwand induziert, muss die Leitfähigkeit des Gefäßes sehr gering sein oder der Torus durch einen Isolatorspalt getrennt sein. Wegen der hohen Beanspruchung durch Druck und magnetische Kräfte, die durch lokal induzierte Ströme hervorgerufen werden können, kommt als Gefäßmaterial vor allem Edelstahl in Frage. Für Diagnostiken, Heizungen und Steuerungen benötigt das Gefäß zahlreiche Öffnungen und Stutzen. Im Fall von ASDEX Upgrade sind dies 115 Öffnungen, das Plasmagefäß von WENDELSTEIN 7-X wird mehr als 300 Öffnungen besitzen, die vakuumdicht angeschweißt oder über Metalldichtungen mit dem Gefäß verbunden werden.

Blick in das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade. Die Wände sind vollständig mit Graphitziegeln bedeckt. Die Kohlenstoffplatten sollen während des Experimentierens die Gefäßwand vor dem heißen Plasma und umgekehrt das Plasma vor metallischen Verunreinigungen aus der Wand schützen.

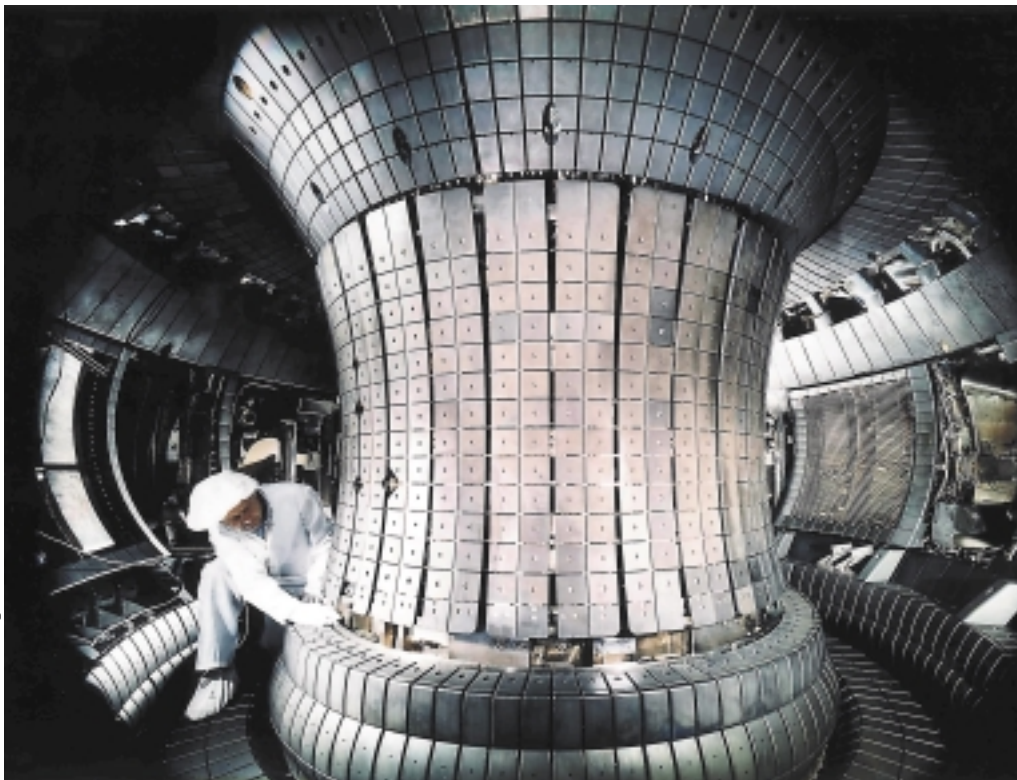
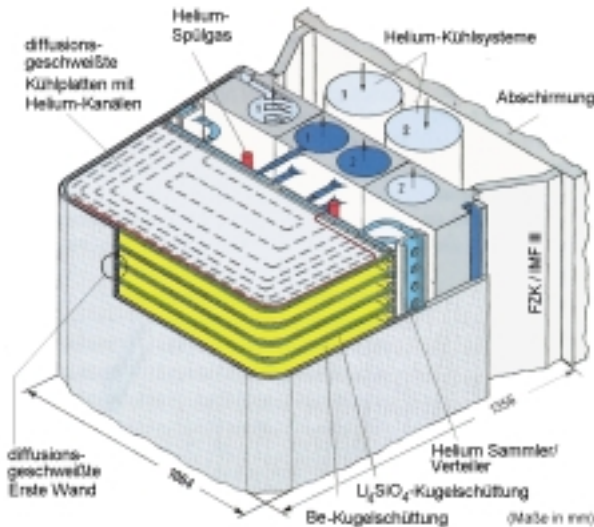


Foto: Thomas Henningsen

Das Blanket

Das Blanket - ein Bauteil, das in heutigen Fusionsexperimenten noch nicht benötigt wird - wird in ITER und einem späteren Fusionskraftwerk eine wichtige Rolle spielen. Dort wird es in rund einem Meter Dicke die innere Wand des Plasmagefäßes bedecken. Die aus dem Plasma kommenden schnellen Fusionsneutronen werden im Blanketmaterial abgebremst. Ihre Bewegungsenergie wandelt sich dabei in Wärme um, die durch ein Kühl-



Aufbau eines Festkörper-Blanket-Moduls

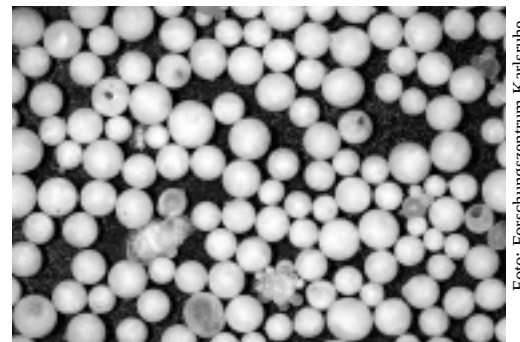
mittel über einen Wärmetauscher und Dampferzeuger zur Stromproduktion weitergeführt wird. Außerdem erzeugen die abgebremsten Neutronen im Blanket aus Lithium den Fusionsbrennstoff Tritium (siehe Seite 9). Eine an der Rückwand des Blankets angebrachte Abschirmung schließlich schirmt die Magnetspulen und äußere Teile der Anlage vor den Neutronen ab.

Das Blanket ist hohen Belastungen ausgesetzt: Dies sind zum einen die Einwirkungen des Plasmas, die sich jedoch nur auf eine relativ dünne Schicht der Ersten Wand auswirken: Teilchen und elektromagnetische Strahlung aus dem Plasma verursachen thermo-mechanische Belastungen sowie hohe Wärmeflussdichten - bis zu 10 Megawatt pro Quadratmeter auf den relativ kleinen Flächen des Divertors und etwa 0,2 Megawatt pro Quadratmeter auf der übrigen Wand. Aktiv gekühlte Bauteile, die Spitzenwerte von 20 Megawatt pro Quadratmeter kontinuierlich abführen können und extremen thermo-mechanischen Belastung standhalten, wurden bereits erfolgreich erprobt. Hinzu kommt die Erosion von Wandmaterial, das durch das Plasma abgetragen wird. Dadurch kann einerseits die

Wand geschädigt werden, andererseits verunreinigen die aus der Wand erodierten Materialien das Plasma. Methoden, dem entgegenzuwirken, werden auf Seite 68 beschrieben. Für das Materialverhalten im Kraftwerk am wichtigsten ist die Belastung durch die energiereichen Fusionsneutronen. Sie dringen in die Erste Wand und das Blanket ein und geben dort ihre Energie ab. Dabei aktivieren sie die Baustoffe und können - je nach Material - Störungen hervorrufen wie Schwellen, Kriechen, Verfestigung und Versprödung.

Es ist die Aufgabe der Materialforschung, neue Materialien für die speziellen Bedingungen in Fusionsanlagen herzustellen und weiterzuentwickeln. So werden im IPP für besonders beanspruchte Stellen des Plasmagefäßes wie Divertor und Erste Wand Materialien und Beschichtungen entwickelt, die hitzebeständig sind gegen physikalische und chemische Erosion. Außerdem Ziel der Entwicklungsarbeiten - in Deutschland vor allem im Forschungszentrum Karlsruhe - sind widerstandsfähige und zugleich niedrig-aktivierbare Werkstoffe. Ihre Zusammensetzung soll zu einer möglichst geringen und rasch abklingenden Aktivierung führen und damit eine einfache Wiederverwendung oder Entsorgung möglich machen.

Die Wechselwirkung von Plasma und Gefäßwand wird in heutigen Experimenten wie ASDEX Upgrade und JET intensiv studiert. Dies kann mit ITER unter kraftwerksrelevanten Plasmabedingungen fortgesetzt werden. Dagegen spielen Neutronenschäden in ITER wegen der vergleichsweise kurzen Entladungen und der geringen akkumulierten Neutronenfluenz von 0,1 Megawattjahren pro Quadratmeter in zehn Jahren Betrieb noch keine große Rolle. Die Entwicklung neutronenbeständiger Materialien muss daher parallel zu ITER vorangetrieben werden. Teilweise können die zu erwartenden Neutronenschäden an Beschleunigeranlagen oder Spalt-



Kügelchen aus keramischem Lithiumoxid (Li_4SiO_4 , Durchmesser rund 0,5 Millimeter)

Foto: Forschungszentrum Karlsruhe

Grafik: Forschungszentrum Karlsruhe

reaktoren simuliert werden, wo in umfangreichen Testreihen unterschiedliche Materialien geprüft werden. Zur endgültigen Qualifizierung der Materialien ist jedoch eine Neutronenquelle erforderlich, in der Proben im reaktorrelevanten Energiebereich mit Neutronen bestrahlt werden können. Eine solche „International Fusion Materials Irradiation Facility“ (IFMIF) wird zur Zeit in internationaler Zusammenarbeit geplant. Die Ergebnisse aus dem Betrieb von ITER und aus der parallel laufenden Materialentwicklung liefern dann die Grundlagen für den Demonstrationsreaktor DEMO, in dem Materialien und Komponenten in Langzeitversuchen erprobt werden können.

Weltweit werden verschiedenste Blanketkonzepte mit unterschiedlichen Kühlmitteln und Strukturmaterialien untersucht. Im Rahmen des europäischen Fusionsprogramms werden für das DEMO-Blanket zwei unterschiedliche Konzepte entwickelt: das Feststoff- und das Flüssigmetall-Blanket. Beide bestehen aus niedrig-aktivierbarem Stahl als Strukturmaterial und werden mit Helium gekühlt. Zur besseren Austauschbarkeit ist das Blanket aus einzelnen Segmenten aufgebaut.

Der wesentliche Unterschied beider Konzepte ist der benutzte Brutstoff zum Erzeugen des Tritiums: Flüssigmetall-Blankets nutzen eine Mischung aus geschmolzenem Lithium und Blei (Schmelzpunkt 235 Grad Celsius). Das Blei dient dabei als Neutronenvervielfacher (hauptsächlich: $^{208}\text{Pb} + n \rightarrow ^{207}\text{Pb} + 2n$), da ansonsten die aus dem Plasma kommenden Neutronen nicht genügend Tritium erzeugen würden. Zur Tritiumabtrennung und Reinigung wird das flüssige Metall langsam nach außen umgewälzt. Die von den Fusionsneutronen im Blanket abgeladene Wärmeenergie wird durch Helium abtransportiert, das bei hohem Druck und hoher Temperatur durch von der Schmelze umgebene Kanäle strömt.

Feststoff-Blankets dagegen setzen Lithiumhaltige Keramiken als Brutmaterial ein. Hier nutzt man Beryllium als Neutronenvervielfacher entsprechend der Reaktion: $n + ^9\text{Be} \rightarrow 2\ ^4\text{He} + 2n$. Brutmaterial und Beryllium werden in fester Form, als kleine Kügelchen, in die Blanketsegmente eingeschüttet.

Ein Feststoff-Blanket ist folgendermaßen aufgebaut (siehe Abbildung links oben): Ein druckfestes stählernes Gehäuse umhüllt die einzelnen Segmente, aus denen das Blanket aufgebaut ist. Das Innere eines jeden Segments ist durch waagrechte Platten

unterteilt, in denen Kühlkanäle verlaufen. Dazwischen befinden sich Kugelschüttungen abwechselnd aus dem Brutmaterial Li_4SiO_4 und dem Neutronenvervielfacher Beryllium. Das im Brutmaterial erzeugte Tritium wird durch Helium ausgespült und abgeführt. Dazu strömt das Gas durch kleine Rohre in die

Foto: EFDA



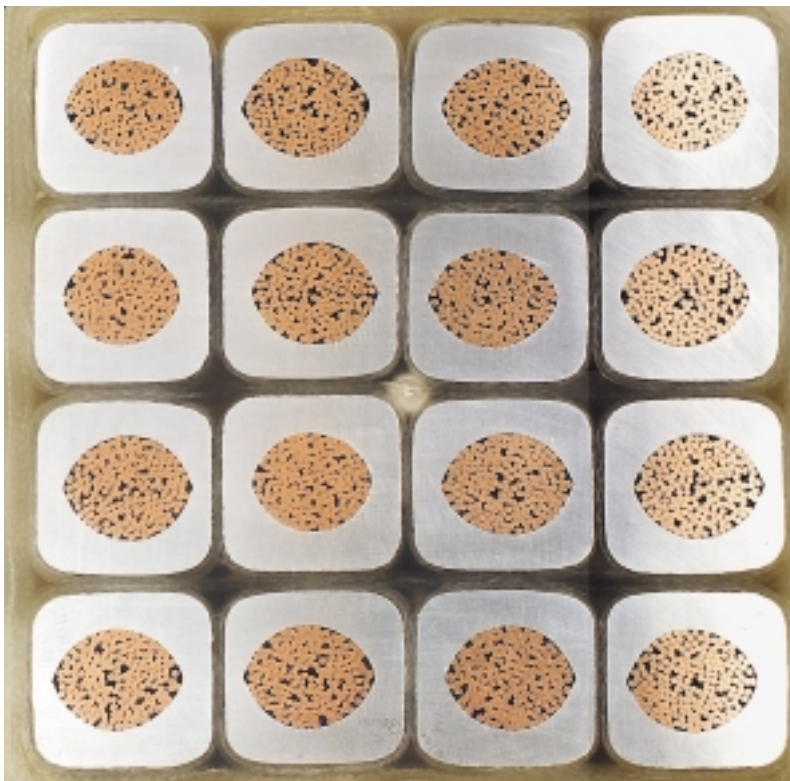
Für ITER ist in der ersten Betriebsphase ein Abschirmblanket vorgesehen; erst später sollen auch Module des Brutblankets erprobt werden. Um die Herstellbarkeit des Abschirmblankets zu prüfen, wurden zwei Module in Originalgröße gefertigt. Hier einer der Prototypen.

Kugelschüttungen und von dort zur Rückwand, wo es durch Sammelleitungen aus dem Blanket abgeleitet wird.

Die Fusionsenergie der Neutronen wird in einem getrennten Kühlkreislauf wiederum durch Helium weitergeleitet. Das Kühlmittel Helium strömt zunächst durch Kanäle direkt hinter der Ersten Wand, dem Bereich höchster Leistungsdichte. So vorgewärmt, strömt es durch die Kanäle in den Platten durch das Blanketinnere auf die Rückwand zu. Hier führen Kanäle mit größerem Querschnitt das inzwischen auf 500 Grad Celsius erhitzte Helium in Richtung Dampferzeuger ab. Bei dieser Temperatur wird ein thermischer Wirkungsgrad von rund 37 Prozent erreicht.

Mit Hilfe von Teststücken sollen beide Konzepte in ITER erprobt werden. Insgesamt können hier bis zu sechs unterschiedliche Brutblanket-Module getestet werden. Geprüft wird dabei die elektromechanische Belastbarkeit der Bauteile bei Magnetfeldänderungen bzw. Stromabbrüchen, die thermo-mechanische Belastbarkeit, d.h. die Festigkeit gegen Verformungen, die durch thermische Ausdehnung hervorgerufen werden könnten, die Neutronenfestigkeit, das Erzeugen, Abtrennen und Migrieren des Tritiums sowie die Kühltechnik.

Da Wirkungsgrad und Leistungsdichte des Blankets wesentlich den Gesamtwirkungsgrad eines Fusionskraftwerkes bestimmen, wird intensiv an Materialien geforscht, die höhere Temperaturen und damit einen höheren Anlagenwirkungsgrad erlauben und zudem die Verfügbarkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit des Bauteils noch verbessern.



**Querschnitt durch eine
Wicklung aus dem
Supraleiterkabel für
WENDELSTEIN 7-X:
Man erkennt die
rechteckigen Kabel-
Windungen, die durch
harzprägnierte
Glasfaser gegeneinan-
der elektrisch isoliert
sind. Eine Aluminium-
Hülle umschließt
jeweils das Seil aus
supraleitenden
Standard-Drähten.
Durch die Hohlräume
zwischen den Drähten
fließt Helium zum
Kühlen auf Tieftempe-
raturen nahe dem
absoluten Nullpunkt.**

Magnetspulen

Die Magnetspulen eines Fusionsexperimentes, die den magnetischen Käfig für das Plasma erzeugen, müssen hohen Belastungen gewachsen sein, da nach dem Einschalten des Spulenstroms starke magnetische Kräfte zwischen den Spulen wirken. Die Spulen müssen daher hohe mechanische Festigkeit besitzen und dürfen sich während des Experimentierens nicht unzulässig verformen. Mit Magnetkräften entsprechend einer Gewichtskraft bis zu 1600 Tonnen drückt zum Beispiel jede der 16 Hauptfeldspulen von ASDEX Upgrade in das Zentrum. Aufgefangen werden solche Kräfte entweder von dem Gesamtverband der Spulen selbst, die sich gegeneinander gewölbeartig abstützen, oder durch massive Stützstrukturen.

Die meisten Fusionsexperimente besitzen heute noch normalleitende Magnetspulen aus Kupfer. Die 2,5 Meter hohen Hauptfeldspulen von ASDEX Upgrade zum Beispiel wurden aus massiven handbreiten Kupferschienen gefertigt. Zur Kühlung sind sie von Bohrungen durchzogen, durch die Kühlwasser fließt. Die Schienen wurden in Einzelwindungen in die gewünschte Spulenform vorge-

bogen, zusammengesetzt und verlötet. Mit Glasfaserbändern isoliert und mit Kunstharz vergossen, erhalten die Windungen ihre Verbindung untereinander und die Spule die nötige mechanische Festigkeit. Die anspruchsvoll geformten Spulen für Stellaratorexperimente werden etwas anders als die flachen Tokamakspulen hergestellt. Statt steifer Kupferschienen benutzt man hier leichter biegbare Kupferlitze, die in Wickelformen eingelegt wird. Wiederum sorgen Glasfaserbänder und Kunstharz für die Festigkeit.

Nur wenige der heutigen Experimente, zum Beispiel der französische Tokamak Tore Supra und der japanische Stellarator LHD (Large Helical Device) arbeiten bereits mit supraleitenden Spulen. Wegen des hohen Stromverbrauchs wird ein späteres Kraftwerk jedoch mit supraleitenden Magneten ausgerüstet sein müssen. Auf tiefe Temperaturen abgekühlt, verbrauchen diese Spulen nach dem Einschalten keine Energie mehr; der Spulenstrom fließt verlustlos. Lediglich die wesentlich geringere Energie zum Kühlen der Spulen ist aufzuwenden. Für Fusionsmagnete kommen vor allem zwei supraleitende Materialien in Frage: Spulen aus Niob-Titan (NbTi) können bei einer Betriebstemperatur von vier Kelvin (minus 269 Grad Celsius) Magnetfelder bis etwa neun Tesla erzeugen; weiter abgekühlt auf 1,8 Kelvin sogar Felder bis 12 Tesla. Höhere Felder bis zu etwa 15 Tesla werden mit Niob-Zinn (Nb₃Sn) erreicht. Anders als Niob-Titan, das mechanisch gut bearbeitbar ist, ist Niob-Zinn jedoch spröde und daher weniger leicht zu verarbeiten. Entwicklungen hin zu nochmals höheren Feldstärken, die höhere magnetische Energiedichten und kompaktere Geometrien ermöglichen, haben mit anderen Materialien - zum Beispiel (NbTi)₃Sn - begonnen.

Supraleitende Spulen aus Niob-Titan sind zum Beispiel für den IPP-Stellarator WENDELSTEIN 7-X mit seiner relativ geringen Magnetfeldstärke von sechs Tesla (gemessen auf den Spulen, d.h. drei Tesla auf der Magnetfeldachse) vorgesehen. Das supraleitende Material ist in dünnen Fasern in Kupferdrähte eingebettet, die zu einem ein Zentimeter dicken Kabel verseilt werden. Flüssiges Helium zum Abkühlen auf vier Kelvin fließt zwischen den Einzeldrähten durch die Hohlräume des Kabels. Dazu ist das Kabel von einer heliumdichten Hülle umgeben, die außerdem - zusammen mit Glasfaser- und Kunstharzverstärkung - auch für die Festigkeit der Spule sorgt. Hierfür wurde ein

besonderes Hüllenmaterial - eine Aluminiumlegierung - gewählt, das während des Wickelprozesses weich und biegsam ist und nachher durch Erwärmen ausgehärtet werden kann. So können die Erfahrungen beim Wickeln der normalleitenden Kupferspulen des Vorgängers WENDELSTEIN 7-AS direkt übernommen werden.

Der für den Testreaktor ITER vorgesehene Leiter aus Niob-Zinn soll ein Magnetfeld von 11,8 Tesla (an der Spule, d.h. 5,3 Tesla auf der Magnetfeldachse) erzeugen. Die supraleitenden Fasern sind in Kupferdrähte eingebettet und mit einem Edelstahlmantel umhüllt, innerhalb dessen das flüssige Helium zirkuliert. Nachdem zunächst Musterstücke geprüft wurden, sollten zwei komplette Modellspulen - je ein verkleinertes Modell für die Transformatorspule und eine der 20 Hauptfeldspulen - das Verhalten des Supraleiters im Verbund testen und die wesentlichen Herstellungsschritte zeigen. Das Modell für die Transformatorspule besteht aus zwei ineinander gesteckten Modulen. Da Niob-Zinn ein sprödes Material ist, wurden in den ursprünglichen Fasern die beiden Komponenten zunächst getrennt in eine Kupfermatrix eingebettet. In diesem Zustand konnte das Kabel problemlos bearbeitet und gebogen werden. Erst nach einer 200stündigen Wärmebehandlung bildete sich dann der supraleitende Verbund. Alle temperaturempfindlichen Arbeitsschritte - wie die elektrische Isolierung, die Imprägnierung mit



Foto: ITER

Kunstharz und schließlich das Verbinden der verschiedenen Lagen - folgten nach der Wärmebehandlung. In einer Testanlage in Naka/Japan geprüft, zeigten Supraleiter und Modellspule schließlich alle verlangten Eigenschaften.

Mit dem Hauptfeldspulen-Modell wollte man vor allem die komplexere Windungstechnik dieses Spulentyps entwickeln: Hierfür wurde ein anderes Stabilisierungs-Konzept genutzt. Das Niob-Zinn-Kabel wurde in ein dünnes Hüllrohr eingezogen, in Form gebogen, dann erhitzt und isoliert. Zur mechanischen Unterstützung wurden die Windungen dann in die spiralförmigen Rillen einer massiven Stahlplatte eingelegt. Fünf dieser beidseitig belegten Platten wurden in einem stützenden Stahlgehäuse zusammengefasst. Die fertige Spule wurde in der Testanlage TOSKA im Forschungszentrum Karlsruhe in einem realistischen magnetischen Umgebungsfeld getestet. Bei Temperaturen von vier Kelvin flossen verlustlos Ströme bis zu 80 Kiloampere - die höchste jemals in einer supraleitenden Magnetspule erreichte Stromstärke.

Die Transformator-Probespule für den internationalen Experimentalreaktor ITER

Foto: FZK



Test der supraleitenden ITER-Modellspule im Forschungszentrum Karlsruhe

Plasmabegrenzung

Das Magnetfeld, das das Plasma einschließt, erfüllt den gesamten Raum des Plasmagefäßes. Infolgedessen breitet sich auch das Plasma so weit aus, bis es die Gefäßwände berührt (siehe Abbildung Seite 22). Die Wand übernimmt dabei - abgesehen von der Strahlung - an den Berührungsstellen die

Blick in das Plasmagefäß des Experimentes ASDEX, das 1990 stillgelegt wurde: Auf beiden Seiten ist ein Limiter angebracht, der an das Plasma herangefahren werden kann. Die engen Schlitze oben und unten führen in die Divertorkammern. Auf diese Weise konnten in ASDEX sowohl Limiter- als auch Divertorentladungen ablaufen.



Foto: Thomas Henningsen

die Fusion nutzloses Licht wieder ab. Um dieses Problem zu entschärfen, werden Limiter daher möglichst aus Materialien mit niedrigen Ladungszahlen hergestellt, zum Beispiel aus Kohlenstoff.

Magnetischer Limiter

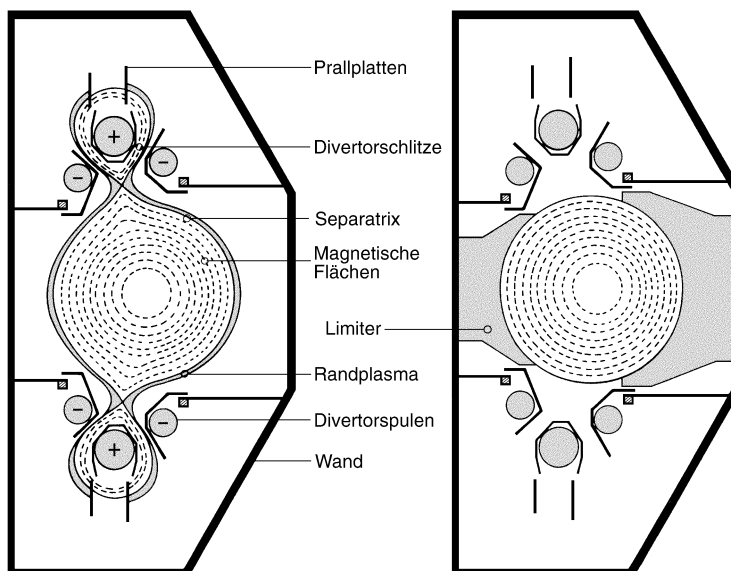
Leistungsfähiger als Limiter sind Anordnungen, die den direkten Kontakt des eingeschlossenen Plasmas mit Wand oder Limiter vermeiden. Dies wird möglich, wenn das Magnetfeld so gestaltet wird, dass auf eine geschlossene äußere Magnetfläche - den letzten geschlossenen „Jahresring“ - nur noch offene Magnetflächen folgen, deren Feldlinien auf die Wand treffen. Die letzte geschlossene

ganze Energie, die aus dem Inneren des Plasmas nach außen transportiert wird. Da sie dafür normalerweise nicht geeignet ist, muss man für eine kontrollierte Begrenzung des Plasmas sorgen. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten:

Limiter

Die einfachste Methode, das Plasma einzugrenzen, ist der Einbau von „Begrenzern“ (Limiter) in das Plasmagefäß, die aus der Gefäßwand in das Plasma hinein ragen. Sie sind so ausgelegt, dass sie die zu erwartenden Energiemengen ungefährdet aufnehmen können. Trotzdem ist es unvermeidlich, dass bei dem Kontakt des Plasmas mit Wand und Limitern Atome - zum Beispiel der Elemente Eisen, Nickel, Chrom oder Sauerstoff - herausgelöst werden und in das Plasma eindringen. 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 für

Magnetfläche wird „Separatrix“ genannt; sie separiert das Gebiet des guten Einschlusses innen von einem nicht eingeschlossenen Gebiet außen. Weil nur die äußeren Zonen der Felder die Wand oder Limiter-ähnliche Strukturen berühren, laufen die meisten Verunreinigungen auf die Wand, bevor sie in das Plasma eindringen können. Weil das gut eingeschlossene Plasma durch die Form des Magnetfeldes begrenzt ist, spricht man von



Zwei Querschnitte durch das ASDEX-Gefäß und die magnetischen Flächen des Feldes: rechts mit Limiter, links mit Divertor. Der Limiter begrenzt das Plasma und fängt alle Teilchen auf, die über die letzte geschlossene Magnetfläche hinausgehen. Im Divertorbetrieb werden die Teilchen, die die Separatrix nach außen überqueren, in den Divertor geführt und dort auf den Prallplatten neutralisiert.

einem „magnetischen Limiter“. Da hier das gut eingeschlossene Plasma nicht in direktem Kontakt mit der Wand steht, kann der Plasmarand viel heißer sein, als bei materieller Limiterbegrenzung. Dies erklärt auch die beobachtete Verbesserung des Einschlusses in solchen Experimenten.

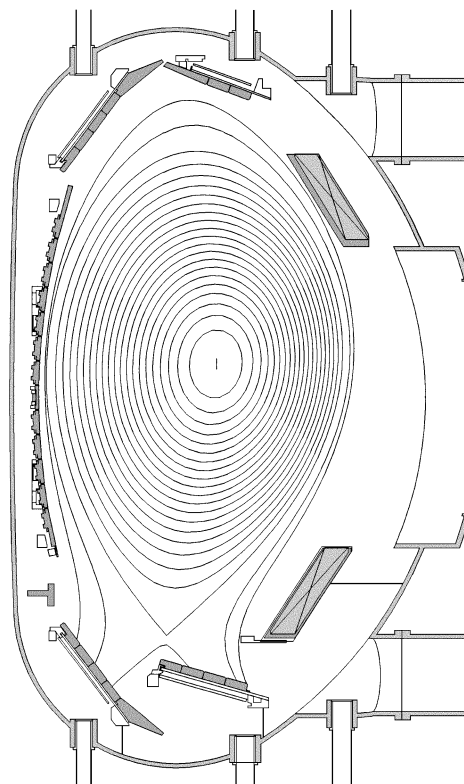
Divertor

Den besten Schutz des Plasmas erhält man, wenn die Feldlinien jenseits der Separatrix nicht direkt auf die Wand treffen, sondern in angemessener Entfernung vom heißen Plasmazentrum auf speziell ausgerüstete Platten gelenkt werden, die die Plasmateilchen auffangen und neutralisieren. Das vor diesen Platten entstehende Neutralgas baut einen gegenüber dem Plasmahauptraum höheren Druck auf und kann dadurch leichter abgepumpt werden.

Die im IPP am Experiment ASDEX (Axialsymmetrisches Divertorexperiment) mit Divertor ausgeführten Experimente haben nicht nur zu besonders sauberen Plasmen geführt, sondern überraschend auch Plasmen mit hohen Einschlusszeiten ermöglicht, die in Limiter-Entladungen nicht erreichbar sind. Daher geht man inzwischen davon aus, dass ein Divertor auch für ein späteres Fusionskraftwerk notwendig ist. So wird der internationale Testreaktor ITER mit einem Divertor ausgerüstet sein. Um dies vorzubereiten, untersucht der ASDEX-Nachfolger ASDEX Upgrade die Funktion des Divertors unter kraftwerksähnlichen Bedingungen.

Brennstoffnachfüllung

Ein über Divertoren begrenztes Plasma verliert ständig Plasmateilchen, die - zusammen mit den Verunreinigungen - von den Divertorpumpen entfernt werden. Bei einem späteren Fusionskraftwerk wird auf diese Weise auch die „Asche“ des Fusionsprozesses, das Helium, entfernt. Zum Nachfüllen gibt es verschiedene Methoden: Gaseinlass vom Gefäßrand, Neutralteilcheninjektion oder Pelletinjektion. Neben dem Gaseinblasen erscheint die Pelletinjektion als besonders geeignete Nachfüllmethode. Dabei wird Deuterium - später eventuell auch Tritium - so stark abgekühlt, bis es gefriert und Kügelchen (Pellets) von wenigen Millimetern Durchmesser geformt werden



Querschnitt durch das Plasma-Gefäß von ASDEX Upgrade und durch die magnetischen Flächen des Feldes. Hier liegen die das Divertorfeld erzeugenden Spulen - wie in einem späteren Kraftwerk - außerhalb des Gefäßes. Daher ist der Divertorraum nicht mehr - wie bei ASDEX - durch enge Schlitze vom Hauptraum getrennt, sondern weit offen.

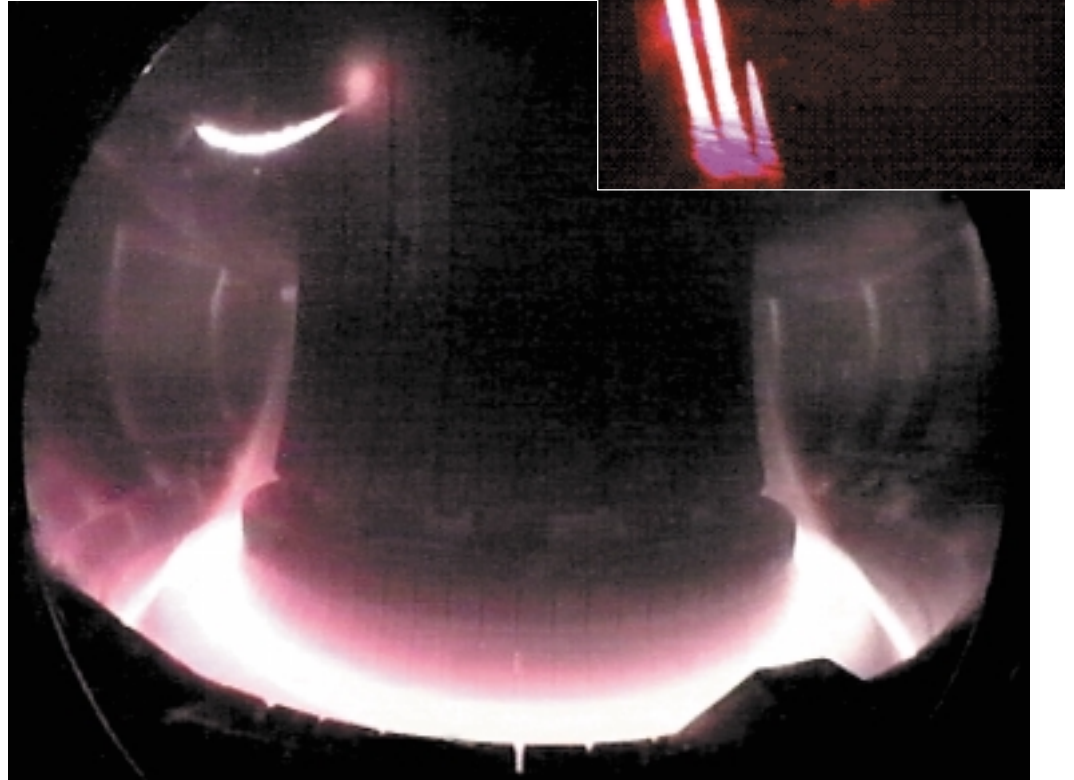
können. In Gaskanonen oder Zentrifugen beschleunigt, werden sie in das heiße Plasma hineingeschossen, wo sie wieder verdampfen und die einzelnen Atome ionisiert werden.

Da die Pellets den Brennstoff tief im Plasmainternen abladen, kann man mit dieser Nachfüllmethode auch das Dichteprofil des Plasmas vorteilhaft verändern sowie - in einem späteren Fusionskraftwerk - das Auswaschen der Fusionsasche Helium aus dem brennenden Plasma verbessern. Die an ASDEX Upgrade installierte und im IPP entwickelte Pelletzentrifuge kann Serien von bis zu 80 Pellets pro Sekunde mit einer Maximalgeschwindigkeit von 1200 Metern pro Sekunde - vierfache Schallgeschwindigkeit - in das Plasma schießen. Dabei kann mit einem einzigen der etwa ein Milligramm schweren Pellets bis zu ein Drittel des Plasmas nachgefüllt werden.

Die Plasmadichte in ASDEX Upgrade kann vollständig über den Pelleteinschuss geregelt werden. Ziel ist es, auf diese Weise nicht nur den zeitlichen sondern auch den räumlichen Verlauf der Plasmadichte zu modellieren: Wird das Plasma mit schnellen Pellets im Zentrum nachgefüllt, spitzt sich die zentrale Plasmadichte zu. Damit verbunden ist eine Verbesserung des Teilchen- und Energieeinschlusses im Magnetfeld, d.h. ein Anstieg der Wärmeisolation der heißen Plasmamitte. Auf diese Weise ließe sich in einem Deuterium-Tritium-Plasma die Zündung erleichtern.

Nach der Zündung ist ein spitzes Dichteprofil jedoch weniger günstig, weil dann bei verbessertem Teilcheneinschluss auch das Verbrennungsprodukt Helium zu lange festgehalten wird und den Brennstoff verdünnt. Erwünscht wäre nun ein flaches Dichteprofil, an dessen steilen Flanken das Helium nach

Blick in das Plasma von ASDEX Upgrade.
Die helle Spur links oben ist die Bahn eines Pellets aus gefrorenem Deuterium, das gerade im Plasma verdampft.
Kleines Bild: Blick von oben auf die Divertorplatten. Man sieht die Spuren von drei kurz hintereinander in das Plasma geschossenen Pellets.



außen in die den Pumpen zugängliche Randschicht gespült würde. Dies lässt sich mit kleinen, langsamen Pellets erreichen, die nur wenig in das Plasma eindringen. Die Pellets werden so zu einem wichtigen Steuerinstrument für das Plasma, dessen Möglichkeiten - insbesondere im Hinblick auf den Testreaktor ITER - an ASDEX Upgrade im Detail studiert werden. Dort weisen jüngste Experimente sogar darauf hin, dass die für den Betrieb von ITER nötigen Plasmadichten nur durch kombiniertes Nachfüllen per Gasblasen und Pelletinjektion erreicht werden können.

Plasmadiagnostik

Die extremen Bedingungen in einem Fusionsplasma erfordern besondere Messmethoden, um seinen Zustand zu diagnostizieren. Generell versucht man, die Eigenschaften des Plasmas zu erkunden, ohne es zu stören, indem man die Wirkungen des

Plasmas nach außen untersucht. Diese Wirkungen äußern sich in magnetischen oder elektrischen Feldern, durch die Aussendung geladener oder neutraler Teilchen sowie durch Strahlung im gesamten Bereich des Frequenzspektrums. Theoretische Arbeiten stellen den Bezug dieser Wirkungen zu den Plasmaeigenschaften her.

Neben diesen „passiven“ Methoden werden auch aktive Verfahren eingesetzt, sofern man sicher sein kann, dass sie das zu untersuchende Plasma nicht verändern. Besonders ergiebig ist die Einstrahlung von Laserlicht oder Mikrowellen, die durch das Plasma beeinflusst werden und so über seine Eigenschaften Auskunft geben können. Auch Teilchenstrahlen werden zur Diagnose verwendet.

Messung der Elektronentemperatur

Die Temperatur der Elektronen äußert sich eindeutig in ihrer Geschwindigkeit. Die Temperaturmessung ist daher eigentlich eine Geschwindigkeitsmessung, die ähnlich funktioniert wie die Radar-Geschwindigkeitsmessung an Automobilen: Ein intensives

Lichtstrahlbündel einer festen Frequenz wird von einem Laser in das Plasma eingestrahlt. Das Licht wird an den bewegten Elektronen gestreut (Thomsonstreuung) und erleidet dabei eine Frequenzänderung, die der Geschwindigkeit der Elektronen entspricht. Aus einer genauen Frequenzmessung des gestreuten Lichtes kann man so die Temperatur der Elektronen berechnen.

Eine andere Methode benutzt die vom Plasma ausgesandte Elektronen-Zyklotronstrahlung. Die Plasmaelektronen, die sich mit der Zyklotronfrequenz auf Spiralbahnen um die Magnetfeldlinien bewegen, strahlen dabei Wellen dieser Frequenz und deren Oberwellen ab. In normalen Fusionsplasmen hängt die Intensität der zweiten Oberwelle dieser Strahlung nur von der Temperatur ab, die auf diese Weise messbar wird. Außerdem kann man aus der Frequenz der Strahlung auf die Magnetfeldstärke und hieraus auf den Entstehungsort der Strahlung schließen. Aus der Messung von Intensität und Frequenz kann also die Verteilung der Temperatur im gesamten Plasma bestimmt werden.

Messung der Elektronendichte

Mit Hilfe der Thomsonstreuung lässt sich nicht nur - aus der Frequenzänderung des Lichtes - die Temperatur der Elektronen, sondern aus der Intensität des gestreuten Lichtes auch deren Dichte bestimmen. Mit geeichten Detektoren, die das Streulicht des Laserstrahls von verschiedenen Orten des Plasmas auf sammeln, erhält man so ein Profil der Elektronendichte über dem Plasmaquerschnitt. Da das benötigte Laserlicht gepulst erzeugt werden muss, ist die Beobachtung des Plasmas mit dieser Methode nur während der kurzen Pulszeiten möglich. Eine hohe Wiederholungsfrequenz des Lasers ist daher wünschenswert. Der an ASDEX Upgrade eingesetzte Laser kann bis zu 120 Impulse pro Sekunde feuern und erlaubt damit eine Messung von Elektronentemperatur und Plasmadichte mit guter Zeitauflösung.

Eine Methode der Dichtemessung, die praktisch stationär arbeitet, nutzt die Veränderung der Lichtgeschwindigkeit im Plasma. Ein Plasma verhält sich wie ein Dielektrikum mit einem von der Frequenz abhängigen Brechungsindex für elektromagnetische Wellen. Zur Messung der Plasmadichte wird eine Mikrowelle gesplittet und der eine Teil



Foto: Stefanie Graul

durch Luft, der andere Teil durch das Plasma geschickt. Bringt man die beiden Teilwellen wieder zusammen, kann man aus dem entstehenden Interferenzmuster auf die Änderung der Wellen-Geschwindigkeit im Plasma und daraus auf die Plasmadichte schließen. Auf diese Weise erhält man ein stationäres Signal über die gemittelte Dichte. Da das Plasma insgesamt neutral ist, ist die Dichte der Wasser-

Auf den Monitoren im Kontrollraum erscheinen die von den Plasmadiagnostiken gewonnenen Messdaten.



Foto: Ulrich Schwenn

Das Fusionsexperiment WENDELSTEIN 7-AS, umringt von Diagnostiken und Heizapparaturen.

Hohlleiter der ECE-Diagnostik an ASDEX Upgrade. Sie leiten die Zyklotronstrahlung der Plasmaelektronen zu Detektoren, die die Elektronentemperatur bestimmen.



Foto: Ulrich Schwenn

stoffionen praktisch identisch mit der Dichte der Elektronen, weshalb eine eigene Messung der Ionendichte nicht nötig ist.

Messung der Ionentemperatur

Bei genügend hoher Plasmadichte kann man meistens davon ausgehen, dass die Ionen die gleiche Temperatur besitzen wie die Elektronen. Da aber die verschiedenen Heizmethoden entweder die Ionen oder die Elektronen heizen, können sich bei Fusionsplasmen deutliche Temperaturunterschiede ergeben. Da die Ionen eine sehr viel größere Masse besitzen als die Elektronen, kann man ihre Temperatur nicht mit der Thomsonstreuung messen. Die Ionen des Plasmas entreißen allerdings, wenn sie bei einem Stoß einem neutralen Atom nahekommen, diesem gelegentlich sein Elektron und werden dadurch selbst neutral (Umladungsneutrale). Dadurch sind sie nicht mehr im Magnetfeld gebunden und können das Plasma verlassen. Misst man die Energien dieser neutralen Teilchen, kann man auf die Temperatur der Ionen im Plasma zurückrechnen.

Eine andere Methode zur Messung der Ionentemperatur benutzt das Licht, das Verunreinigungsatome im Plasma ausstrahlen. Die Wasserstoffatome sind im Plasma vollständig ionisiert und leuchten daher nicht mehr. Verunreinigungsatome mit vielen Elektronen sind jedoch noch nicht völlig ionisiert. Ihre Elektronen strahlen Licht fester Wellenlängen ab, die sogenannte Linienstrahlung,

die für die jeweilige Ionen- oder Atomsorte charakteristisch ist. Diese Frequenzen ändern sich in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, mit der sich die Ionen relativ zum Beobachter bewegen. Aus einer genauen Frequenzmessung kann man also auf die Geschwindigkeit und damit die Temperatur der Teilchen schließen.

Messung von Plasmaverunreinigungen

Über die Analyse der charakteristischen Linienstrahlung aus dem Plasma können auch die Plasmaverunreinigungen identifiziert und ihre Konzentration im Plasma festgestellt werden. Vergleicht man die so gewonnenen **P r o f i l e** der Verunreinigungskonzentration mit Transportmodellen, so lässt sich auch Aufschluss über Transportprozesse im Plasma gewinnen.

Da die von einer Ionensorte ausgesandte Linienstrahlung stark von der Temperatur abhängt, überstreicht die Strahlung aus einem verunreinigten Plasma einen weiten Frequenzbereich. Zum Beispiel sind leichtere Atome wie Sauerstoff im heißen Plasmazentrum vollständig ionisiert und senden dort daher keine Linienstrahlung aus. Nur schwere Atome - wie Metalle - geben auch noch im Plasmazentrum Linienstrahlung ab. Mit zunehmendem Abstand vom heißen Zentrum sind die Sauerstoffionen jedoch immer weniger ionisiert und befinden sich in tieferen Energiezuständen, was sich in der niedrigeren Frequenz ihrer Linienstrahlung widerspiegelt. Vom kalten Plasmarand kommt daher vorwiegend Licht aus dem sichtbaren Teil des Spektrums, während in den weiter innen liegenden Zonen Ultraviolett-Licht und von hochgeladenen Ionen im Plasmazentrum sogar Röntgenstrahlung ausgesandt wird. Daher benutzt man jeweils verschiedene spektroskopische Techniken, um die Linienstrahlung in den unterschiedlichen Frequenzbereichen zu messen.

Messung des Magnetfeldes

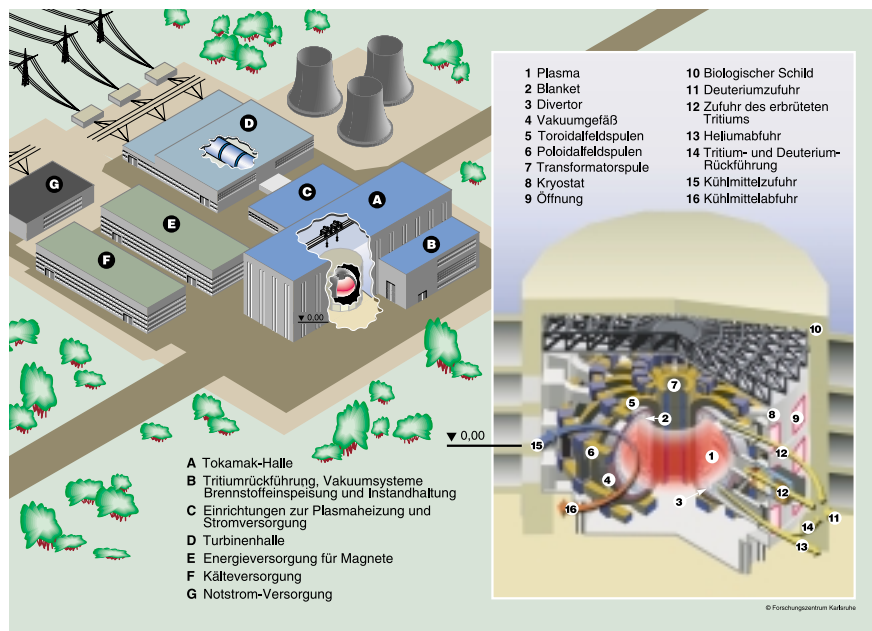
Veränderungen der Magnetfelder werden mit kleinen Spulen beobachtet, die in das Plasmagefäß eingebaut sind. Ein sich veränderndes Magnetfeld induziert nämlich eine Spannung in den Spulen, die gemessen wird. Aus Messungen an vielen derartigen Spulen oder Drahtschleifen können die Stärke des Plasmastroms, die Position der Plasmasäule im Gefäß und Informationen über Lage und Struktur der magnetischen Flächen abgeleitet werden.

Das Fusionskraftwerk

Aufbau und Funktion

Kernstück eines Fusionskraftwerks ist eine ringförmige Brennkammer. Sie enthält das heiße Deuterium-Tritium-Plasma, das durch Magnetfelder von der innersten, sogenannten „ersten Wand“ ferngehalten wird. Bis zur Zündung führt eine Startheizung dem Plasma für einige Sekunden eine Leistung von etwa 50 bis 100 Megawatt zu. Die schnellen Heliumkerne, die bei den nun einsetzenden Fusionsreaktionen entstehen, sind als geladene Teilchen im Magnetfeld gefangen und geben ihre Energie über Teilchenstöße an das Plasma ab. Schließlich kann die äußere Heizung abgeschaltet werden; das Plasma brennt selbständig weiter und hält die hohen Fusionstemperaturen per Selbstheizung aufrecht. Über den Divertor werden die entstehenden Heliumteilchen - zusammen mit Verunreinigungen aus den Gefäßwänden - laufend aus dem Plasma entfernt, um ein Erlöschen des Fusionsfeuers zu verhindern. Die Fusionsneutronen dagegen können den Magnetfeldkäfig wegen ihrer elektrischen Neutralität ungehindert verlassen.

Das Plasmagefäß ist umgeben von einem lithiumhaltigen Mantel, dem „Blanket“. Hier erzeugen die einfallenden Fusionsneutronen aus Lithium den Fusionsbrennstoff Tritium. Er wird aufgesammelt und über Zwischenspeicher dem brennenden Plasma zusammen mit dem zweiten Brennstoffmaterial Deuterium wieder zugeführt. Etwa 20 Gramm Tritium pro Stunde verbraucht ein Kraftwerk von 1000 Megawatt elektrischer Leistung. Im



Grafik: Forschungszentrum Karlsruhe

Blanket wird außerdem die Energie der einfallenden Neutronen aufgenommen: Die schnellen Teilchen werden im Blanketmaterial abgebremst, das sich auf diese Weise erwärmt. Diese Wärmeenergie wird dann über Kühlmittel, Wärmetauscher, Dampferzeuger und Turbogenerator in elektrische Energie umgewandelt. Das Blanket wiederum ist von einer abschirmenden Hülle umgeben. Sie hält Strahlung und Neutronen aus dem Plasma von den supraleitenden Magnetspulen, den Heizapparaturen und der übrigen Umgebung weitgehend fern. Den gesamten Kraftwerkskern umgibt schließlich eine äußere Sicherheitshülle. Einen Überblick über typische Daten eines Tokamak-Kraftwerks gibt die Tabelle (zum Stellarator-Kraftwerk siehe Seite 66).

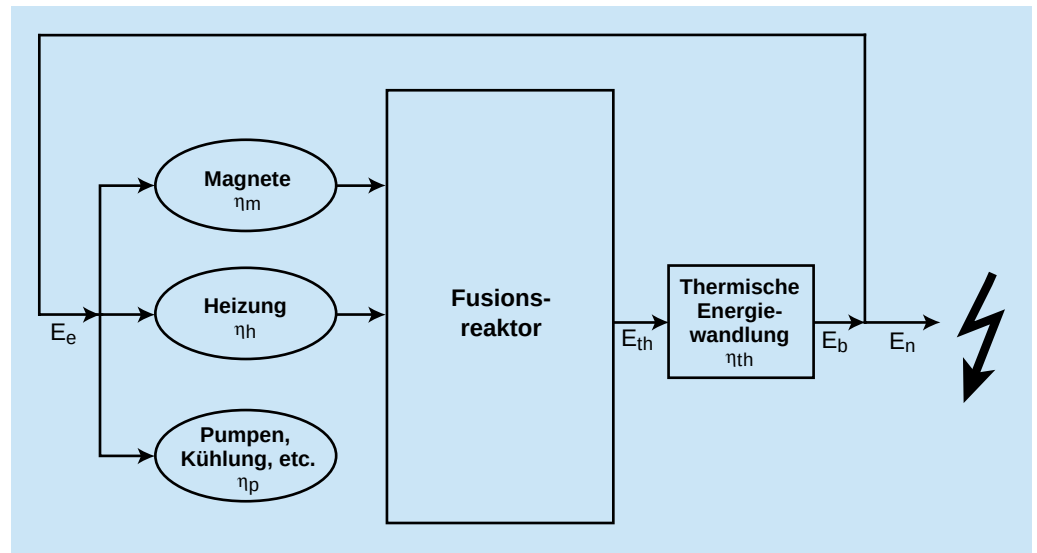
Wie alle Kraftwerke soll auch ein Fusionskraftwerk die freigesetzte Wärmeenergie mit möglichst hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie umwandeln (oder direkt als thermische Energie nutzen). Dabei muss die Energiebilanz auch den Eigenbedarf des Kraftwerks berücksichtigen. Ein Teil der erzeugten elektrischen Bruttoenergie wird nämlich zur Deckung des elektrischen Eigenbedarfs benötigt, d.h. zum Betrieb der Hilfssysteme des Kraftwerkes verwendet. Hierzu gehören die Plasmaheizung, das

Schematische Darstellung eines Fusionskraftwerks

Großer Plasmaradius:	9 Meter
Plasmahöhe:	10 Meter
Plasmabreite:	6 Meter
Plasmavolumen:	760 Kubikmeter
Magnetfeld:	7 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	28 Megaampere
Startheizung und Stromtrieb:	234 Megawatt
Wandbelastung durch Neutronen:	1,8 Megawatt pro m ²
Fusionsleistung:	3400 Megawatt
Brenndauer:	Dauerbetrieb

Charakteristische Daten eines Tokamak-Kraftwerks

(Quelle: D. Maisonnier et al., Power Plant Conceptual Study, 2002)



Magnetsystem, das System zum Stromtrieb (bei einem Kraftwerk vom Tokamak-Typ), Pumpen, Kühlung und die Anlagen zur Tritiumabtrennung. Da auch die Hilfssysteme nicht verlustfrei, sondern mit Wirkungsgraden η_m , η_h und η_p arbeiten, taucht nur ein Teil der zu ihrem Antrieb verwendeten Energie in der insgesamt vom Kraftwerk abgegebenen Wärmeenergie wieder auf. Diese Gesamtenergie wird in der thermischen Energie-wandlung, zum Beispiel in einem Dampfturbinenprozess, mit dem Wirkungsgrad η_{th} in die elektrische Bruttoenergie E_b umgewandelt. Die nutzbare elektrische Energie E_n ergibt sich daraus nach Abzug des Eigenbedarfes E_e des Kraftwerkes (siehe Abbildung oben).

Vereinfachtes Energieflussdiagramm eines Fusionskraftwerks. Dabei ist:

E_e = energetischer Eigenbedarf des Kraftwerks

E_{th} = thermische Fusionsenergie

E_b = elektrische Bruttoenergie

E_n = nutzbare elektrische Nettoenergie

η_m = Wirkungsgrad der Magnete

η_h = Wirkungsgrad der Plasmaheizung

η_p = Wirkungsgrad der Pumpen, Kühlung

η_{th} = Wirkungsgrad der thermischen Energiewandlung

Sicherheits- und Umwelteigenschaften der Fusion

Aussagen über Sicherheit und zu erwartende Umwelteinflüsse eines späteren Fusionskraftwerks werden durch Kraftwerksentwürfe möglich, die in den letzten Jahren nahe an die Praxis herangerückt sind. Die Fusionsanlagen der nächsten Generation - zum Beispiel der Internationale Experimentalreaktor ITER - sollen Fusionsleistungen von mehreren hundert Megawatt liefern und entsprechen insofern beinahe schon einem Leistungsreaktor.

Auf Grundlage dieser Arbeiten kann man einem Fusionskraftwerk die folgenden günstigen Eigenschaften zusprechen:

- In einem Fusionskraftwerk ist ein Unfall mit katastrophalen Folgen unmöglich.
- Es gibt es keine Kettenreaktion oder ähn-

liche Leistungsanstiege, die zum „Durchgehen“ des Kraftwerks führen könnten.

- Die auftretenden radioaktiven Substanzen - Tritium sowie aktivierte Bauteile - haben ein relativ niedriges biologisches Gefährdungspotential.

- Langfristig sieht man die Möglichkeit, Menge und Aktivität der entstehenden radioaktiven Stoffe durch geeignete Materialentwicklung ganz erheblich zu vermindern. Nahezu vollständiges Rezyklieren des Abfalls könnte möglich werden.

- Es werden bei der Energieerzeugung keine Treibhausgase freigesetzt, ebenso wenig Stick- oder Schwefeloxide.

Weder die von außen zugeführten Rohbrennstoffe - Deuterium und Lithium - noch ihr Reaktionsprodukt Helium sind radioaktiv. Sicherheitsüberlegungen werden jedoch nötig im Zusammenhang mit dem im Kraftwerk erzeugten radioaktiven Tritium. Hinzu kommt die Aktivierung der plasmanahen Bauteile -

insbesondere Brennkammerwand und Brutmantel - durch die bei der Fusion freigesetzten energiereichen Neutronen. Wie intensiv diese Aktivierung ausfällt, hängt sehr stark von den Materialien ab, auf die die Neutronen auftreffen. Anstelle der heute einsetzbaren Stahlsorten werden für die erste Wand und das Blanket spezielle Materialien mit niedrigem Aktivierungspotential entwickelt. Dabei arbeitet man an Stählen ohne störende Beimengungen, wie zum Beispiel Nickel, Kobalt und Molybdän, an Vanadiumlegierungen oder an nichtmetallischen Materialien wie Silizium-Carbid. Durch die Entwicklung geeigneter Baumaterialien und die Verringerung der im Kraftwerk vorhandenen Tritiummenge kann man deshalb bei der Fusion die Gefahr durch radioaktive Stoffe beeinflussen und ganz wesentlich reduzieren. Dies ist anders im Falle der Kernspaltung, wo die anfallende Radioaktivität durch die Spaltprodukte naturgesetzlich mit der erzeugten Energie verknüpft ist und zwangsläufig entsteht.

Tritium, die schwerste und einzige radioaktive Variante des Wasserstoffs, besitzt eine Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Durch die Höhenstrahlung entstehen auf natürliche Weise ständig geringe Mengen an Tritium; das Weltinventar wird auf etwa sieben Kilogramm geschätzt. Eine europäische Richtlinie, die radioaktive Stoffe nach ihrer Schadenswirkung in vier Klassen - sehr hohe Radiotoxizität, hohe, mäßige und niedrige - einteilt, ordnet Tritium in Klasse vier ein: niedrige Radiotoxizität. Seine radioaktive Strahlung - Beta-Strahlung, das heißt Elektronen - ist zu energieschwach, um menschliche Haut durchdringen zu können. Für Lebe-

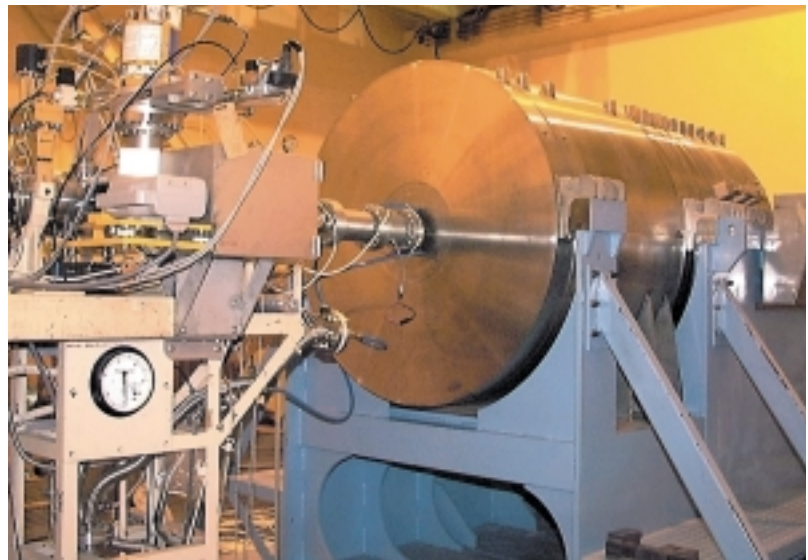


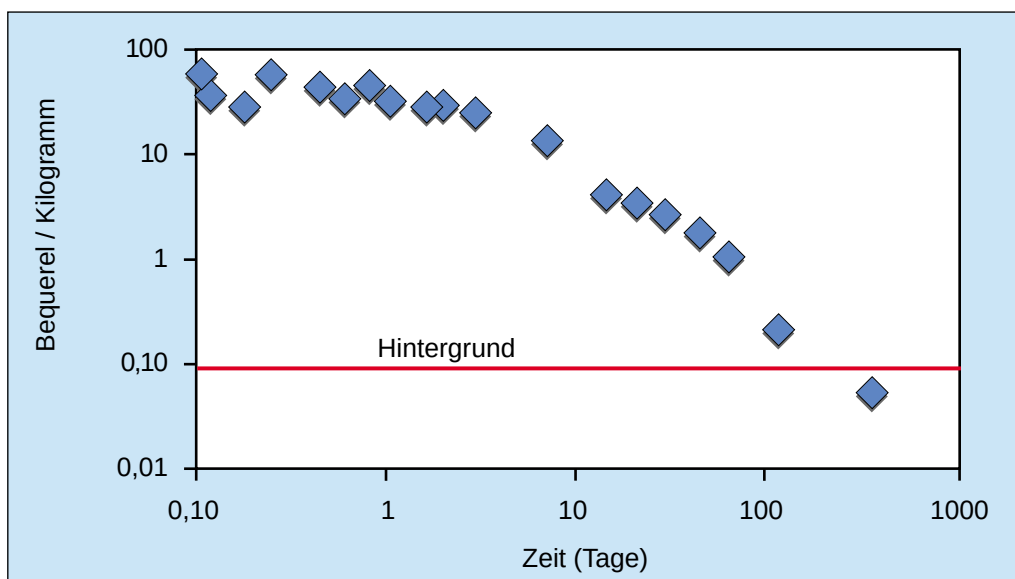
Foto: JAERI, Naka

wesen wird sie schädlich, wenn das Tritium durch Einatmen, Essen, Trinken oder Diffusion durch die Haut vom Körper aufgenommen wird. Einmal in den Körper gelangt, besitzt Tritium dort eine effektive biologische Halbwertszeit von etwa zehn Tagen. Im Ökosystem verdünnt sich Tritium schnell (siehe Abbildung unten) und kann Landstriche nicht für längere Zeit kontaminieren. Ebenso wenig gibt es Anzeichen für eine Tritiumanreicherung in der Nahrungskette.

Radioaktive Belastung im Normalbetrieb

Da das sehr flüchtige Tritium erst an Ort und Stelle im Brutmantel aus Lithium-haltigen Materialien erzeugt wird, läuft der Brennstoff für die Fusion nur im Inneren des Kraftwerks um. Sicherheitstechnisch ist dies von Vorteil. Insgesamt wird ein Fusionskraftwerk einige Kilogramm Tritium enthalten, wovon ein

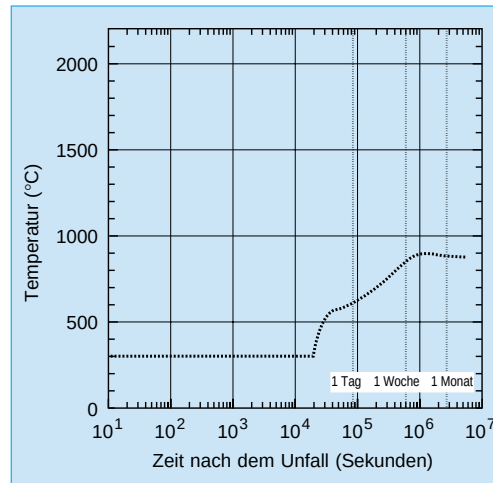
In der Fusionsneutronenquelle FNS in JAERI, Japan, wird unter Neutronenbestrahlung die Aktivierung und Neutronenabschirmung von Fusionsmaterialien untersucht.



Experiment zum Verhalten von Tritium in der Umwelt: Freigesetzt wurden zehn Milligramm Tritium. Die im Boden in einer Tiefe von 0 bis 20 Zentimeter gemessenen Tritium-Konzentration nahmen im Laufe eines Jahres schnell ab.

(Quelle: R.M. Brown et al., Field Studies of HT Oxidation and Dispersion in the Environment II. The 1987 June Experiment at Chalk River; Canadian Fusion Fuels Technology Project, CFFTP-G-88007, Ontario Hydro, Canada, October 1988.)

Temperaturverlauf nach einem Unfall - vollständiger Stromausfall, d.h. Verlust der gesamten Kühlung - im Innern eines Fusionskraftwerks (aus niedrig aktivierbarem Stahl). Die Temperaturen bleiben stets weit unterhalb des Schmelzpunktes von Stahl (etwa 1400 °C).



großer Teil fest in Speichern und Metallen gebunden ist. Sicherheit und Umwelteinflüsse hängen entscheidend von der Rückhaltung des Tritiums im Kraftwerk ab. Hierzu dient ein System von mehrfach überwachten, ineinander geschachtelten Umhüllungen. Nach bisherigen technischen Erfahrungen nimmt man an, dass im Normalbetrieb etwa ein Gramm Tritium pro Jahr aus dem Kraftwerk entweichen kann.

Die von den Fusionsneutronen aktivierten Strukturmaterialien besitzen Halbwertszeiten im wesentlichen zwischen einigen Monaten und einigen Jahren. Sie sind alle als feste Metalle in die innere Kraftwerkskonstruktion eingebunden. Auch Korrosionsprodukte spielen hier keine große Rolle, so dass die aktivierten Bauteile im Normalbetrieb wenig zur Freisetzung von Radioaktivität an die Umwelt beitragen.

Die von allen Freisetzungen an Tritium und aktiviertem Strukturmaterial hervorgerufene radioaktive Belastung führt zu einer Dosis von weniger als einem Prozent der natürlichen radioaktiven Belastung von etwa 2

Millisievert pro Jahr in Deutschland. Sie liegt damit deutlich unterhalb der Dosischwankung der natürlichen Radioaktivität von Ort zu Ort. Berechnet wurde dies für eine Person, die sich ständig in einem Kilometer Entfernung vom Kraftwerk aufhält und alle Nahrungsmittel aus unmittelbarer Kraftwerksumgebung bezieht.

Störfälle

Zukünftige Fusionskraftwerke lassen eine große Sicherheit vor Unfällen erwarten, die die Umgebung gravierend belasten könnten:

Die Brennstoffmenge in der Plasmakammer ist - mit etwa einem Gramm - sehr klein und reicht nur für rund eine Minute Brenndauer aus. Ebenso sind die Leistungsdichten im Plasma und Blanket mit etwa drei bzw. zwanzig Watt pro Kubikzentimeter gering. Sie entsprechen in etwa der Leistungsdichte normaler Glühlampen.

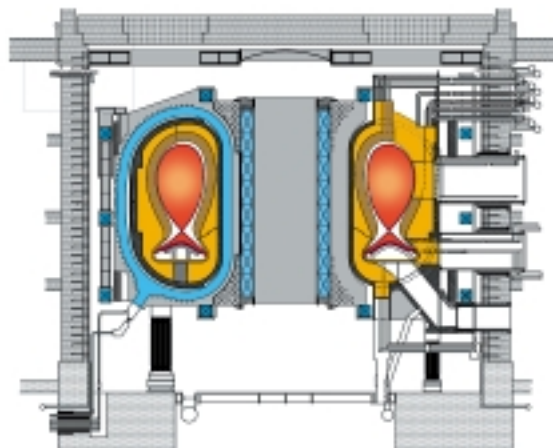
Ein unkontrollierter starker Leistungsanstieg ist nicht möglich, denn jede Änderung der Betriebsbedingungen bringt über Plasmainstabilitäten den Brennvorgang sehr schnell zum Erlöschen.

Auch die Nachwärme nach Abschaltung des Kraftwerks reicht nicht aus, um ganze Bauteile zu schmelzen (siehe Abbildung oben). Das gleiche gilt für die restlichen in der Anlage gespeicherten Energien, wenn man daran festhält, als Brutmaterial kein reines Lithium in flüssiger Form zu verwenden.

Die wichtigste Folgerung aus diesen naturgesetzlich gegebenen Eigenschaften ist: Ein Fusionskraftwerk kann so konstruiert werden, dass es keine Energiequellen enthält, die seine Sicherheitshülle von innen zerstören könnten. Konstruktionsziel kann es damit sein, die Folgen eines Störfalls auf das Innere der Anlage zu beschränken.

In Studien zu möglichen Störfällen und ihren Folgen werden diese grundsätzlichen Eigenschaften genauer untersucht, insbesondere auch im Rahmen des internationalen ITER-Projekts. Viele technische Details des zukünftigen Kraftwerks sind heute noch nicht festgelegt. Die Analysen, deren Ergebnisse die Planung fortwährend beeinflussen, sollen zunächst dazu dienen, mögliche Störfallursachen zu erkennen und durch passive Mechanismen auszuschalten: Eine Gefahrensituation wäre gegeben, wenn durch einen Unfall Tritium oder auch aktiviertes Material der Bauteile - als Metallstaub oder nach längerem Ausfall der Kühlung als

Querschnitt durch ein Fusionskraftwerk. Pläne ähnlicher Art liegen den System- und Sicherheitsstudien zugrunde.

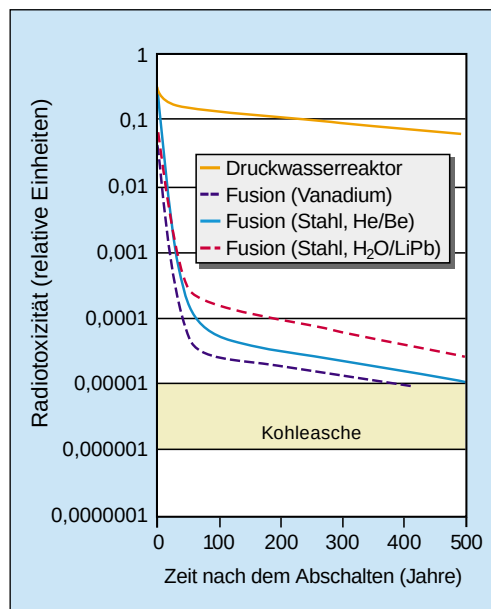


flüchtige Oxide - innerhalb des Gebäudes freigesetzt würden. Es ist heute noch nicht genau bekannt, wieviel festes Material auf diese Weise mobilisiert werden könnte. Grobe Abschätzungen ergeben mehrere Kilogramm Metallstaub. Genauere Daten hierzu soll das ITER-Experiment liefern. Die freisetzbare Tritiummenge will man vor allem durch die Reduktion des insgesamt in der Anlage vorhandenen Tritiums begrenzen sowie durch dessen Unterteilung in getrennte Teilinventare.

Da das Kraftwerk seine Sicherheitshülle von innen nicht durchbrechen kann, hätten diese Unfälle geringe Auswirkungen nach außen. Für die schwersten Unfälle in der Anlage ergeben detaillierte Abschätzungen maximale Dosiswerte in der Höhe der natürlichen radioaktiven Belastung. Die in Deutschland geltenden Richtwerte sowohl für die Genehmigung der Anlage als auch für die Einleitung von Evakuierungsmaßnahmen nach einem Unfall würden also deutlich unterschritten. Für die Anlagengenehmigung gilt in Deutschland ein Dosisgrenzwert von 50 Millisievert für die sogenannten „Auslegungstörfälle“. Dabei wird die sich in fünfzig Jahren ergebende Gesamtdosis der meistbelasteten Person durch alle Einwirkungsmöglichkeiten, d.h. Bestrahlung, Einatmen und Nahrungsaufnahme, unter den ungünstigsten Wetterbedingungen zugrunde gelegt. Eine Evakuierung ist zu erwägen, wenn die Gesamtdosis der am meisten belasteten Person durch Bestrahlung und Einatmen während einer Woche am Ort der höchsten Belastung 100 Millisievert übersteigt.

Auch äußere Einwirkungen - zum Beispiel Erdbeben oder Flugzeugabsturz - werden durch die Sicherheitshülle abgefangen. Es bleibt jedoch eine verschwindend kleine, aber dennoch denkbare Wahrscheinlichkeit, dass eine äußere Katastrophe extremer Stärke eintritt, zum Beispiel ein unvorhersehbar starkes Erdbeben, das die Sicherheitshülle beschädigt. Auch für diesen äußersten, auslegungsübergreifenden Störfall wurden Abschätzungen gemacht: Schadensobergrenze in diesem Fall wäre etwa ein Kilogramm Tritium, das in die Umgebung freigesetzt würde. Bei ungünstigen Wetterbedingungen - d.h. Wind, der konstant aus einer Richtung bläst - könnte dann in einem in Windrichtung orientierten, etwa zwei Quadratkilometer großen Landsektor in der Nähe der Anlage die Belastung bis zu 450 Millisievert betragen (Gesamtdosis der am meisten belasteten Person durch Bestrahlung und Einatmen während

einer Woche). Jenseits dieses Bereiches liegt die Belastung wieder unter dem Evakuierungsrichtwert von 100 Millisievert. Angesichts dieser moderaten Werte ist davon auszugehen, dass die von der äußeren Einwirkung in der Umgebung hervorgerufenen Schäden die durch das Fusionskraftwerk hinzugefügten Schäden um ein Vielfaches übertreffen würden.



Abfall

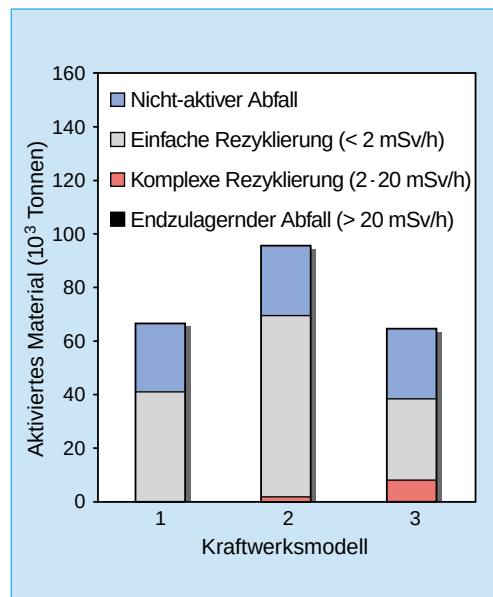
Während der etwa 30jährigen Lebenszeit der Anlage werden der Divertor, die erste Wand und das Blanket aufgrund der hohen Belastung und des Abbrandes mehrfach ausgetauscht werden. Zusammen mit den aktivierten Bauteilen, die nach Betriebsende zurückbleiben, erzeugt ein Fusionskraftwerk je nach Bauart insgesamt zwischen 65 000 und 95 000 Tonnen radioaktiven Materials. Ein Fusionskraftwerk würde damit etwa das gleiche bis doppelte Volumen an radioaktivem Abfall erzeugen wie Spaltreaktoren vergleichbarer Energieerzeugung - je nachdem, ob der Spaltabfall endgelagert oder wieder aufgearbeitet wird. (Keine Entsprechung bei der Fusion gibt es für die pro Spaltkraftwerk anfallenden 1,5 Millionen Kubikmeter Erzreste aus dem Uranabbau. Sie müssen sorgfältig abgedeckt werden, weil sie sonst längerfristig größere Mengen des radioaktiven Gases Radon und radioaktive Stäube freisetzen.)

Die Umwelteigenschaften von Fusions- und Spaltabfall sind jedoch sehr verschieden: So sind die Halbwertszeiten der wesentlichen Fusionsrückstände bedeutend kleiner - ein bis fünf Jahre gegenüber 100 bis 10 000 Jahren

Radiotoxischer Inhalt verschiedener Kraftwerkstypen gleicher elektrischer Energieabgabe, bezogen auf die Nahrungsaufnahme (Ingestion). Aufgetragen ist in relativen Einheiten die zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität nach Stilllegung der Anlage (einschließlich ausgetauschter Bauteile):

- 1) Fusionskraftwerk aus niedrig aktivierbarem Stahl und wassergekühltem Blanket,
- 2) Fusionskraftwerk aus niedrig aktivierbarem Stahl und heliumgekühltem Blanket,
- 3) Fusionskraftwerk aus einer Vanadiumlegierung,
- 4) Druckwasserreaktor
- und 5) Kohlekraftwerk.

Verwertungsmöglichkeiten des Fusionsabfalls für verschiedene Kraftwerksmodelle: Heliumgekühltes Blanket aus Vanadiumlegierung (1), wassergekühltes Blanket aus niedrig aktivierbarem Stahl (2), Heliumgekühltes Blanket aus niedrig aktivierbarem Stahl (3).



im Falle der Kernspaltung. Das biologische Gefährdungspotential oder der radiotoxische Inhalt der Fusionsabfälle klingt rasch ab und ist im Vergleich zu Spaltabfall nach hundert Jahren bereits mehr als tausendfach geringer. Nach hundert bis fünfhundert Jahren ist es vergleichbar mit dem Gefährdungspotential der gesamten Kohleasche aus einem Kohlekraftwerk gleicher Energieerzeugung. (Kohleasche enthält stets natürliche radioaktive Stoffe wie Uran, Thorium und ihre Tochterelemente, allerdings in wesentlich verdünnter Form.)

Von der Gesamtmasse des Fusionsabfalls können 30 bis 40 Prozent sofort und unbeschränkt freigegeben werden. Weitere 60 Prozent können nach fünfzig bis hundert Jahren fernbedient rezykliert und in neuen Kraftwerken wiederverwendet werden (siehe Abbildung oben). Längerfristig gelagert werden müssten nach heutigem Wissen lediglich wenige - ein bis einige - Prozent des Materials. Gemäß derzeitiger EU-Regelung müsste das Endlager wegen der vergleichsweise geringen Radiotoxizität wohl nicht tiefer als etwa 50 Meter sein.

Da die Recyclingtechnik für Fusionsabfall noch nicht entwickelt und ihre Wirtschaftlichkeit daher gegenwärtig nicht prüfbar ist, wurden trotz der Möglichkeit, die Materialien wiederzuverwenden, auch ihre Eigenschaften in einem Endlager untersucht. Hier wäre die geringe Nachwärme von Vorteil, da sie eine größere Packungsdichte ermöglicht. Die maximale Nachwärme pro Kilogramm Fusionsabfall ist hundert mal niedriger als bei Spaltabfall. Der Platzbedarf ist also wesentlich geringer.

Es ist noch unbekannt, ob es langfristig gelingen kann, anstelle der Deuterium-Tritium-Fusion andere Fusionsreaktionen wie Deuterium-Deuterium, Deuterium-Helium-3 oder Proton-Bor (siehe Seite 9) technisch nutzbar zu machen. Hier würde die Tritiumherstellung im Kraftwerk und die Neutronenaktivierung noch einmal vermindert werden oder nahezu ganz verschwinden.

Sozio-ökonomische Arbeiten zur Fusion

Auch wenn es bis zur technischen und wirtschaftlichen Einsatzbereitschaft von Fusionskraftwerken noch einige Zeit dauern wird, ist schon heute zu fragen, welche Eigenschaften diese Anlagen besitzen und wie sie sich im Vergleich zu anderen Energiewandlungstechniken darstellen werden. Dabei ist ganz allgemein zu berücksichtigen, dass Energie einer der zentralen Produktionsfaktoren der modernen Volkswirtschaften ist und in ihrer guten oder mangelhaften Verfügbarkeit den Lebensstil einer Gesellschaft grundlegend prägen kann.

Analysen dieser Art sind die Aufgabe der SERF-Aktivitäten (Socio-Economic Research on Fusion), die 1998 im Rahmen des Europäischen Fusionsprogramms ins Leben gerufen wurden. Dazu muss zunächst ein realistisches Bild eines Fusionskraftwerks entwickelt werden. Sodann ist zu beschreiben, wie die zukünftige Energiewirtschaft insgesamt aussehen könnte und welche Rolle insbesondere Umwelt- und Sicherheitseigenschaften darin spielen.

Die Eigenschaften eines künftigen Fusionskraftwerks werden in Systemstudien unter den verschiedensten Fragestellungen, insbesondere Kosten und Umweltaspekte, untersucht. Da das ITER-Experiment einem späteren Kraftwerk bereits sehr nahe kommt, folgen auch aus den Planungen für ITER wesentliche Informationen.

Kosten des Fusionsstroms

Die Stromgestehungskosten der Fusion lassen sich vorerst nur mit großen Unsicherheiten angeben. Die Grundlagen dafür liefern Systemstudien sowie die für den Testreaktor ITER abgeschätzten Kosten. Letztere sind besonders aussagekräftig, weil sie in engem Zusammenwirken mit der Industrie erarbeitet wurden. Zudem werden die Kosten der Fusion stark von den physikalischen und

technischen Fortschritten beeinflusst werden, die in den nächsten Jahrzehnten erzielt werden können.

Die Stromgestehungskosten eines jeden Kraftwerks setzen sich zusammen aus den Investitionskosten, den Betriebs- und Brennstoffkosten sowie den Kosten für den Abbau der Anlage und die Lagerung der Abfälle. Eine Abschätzung der Investitionskosten für die wesentlichen Elemente eines Fusionskraftwerks gibt die Abbildung unten. Zugrunde gelegt sind dabei Annahmen, die mit den heute erreichten Werten gut in Einklang zu bringen sind. Zugleich sind die physikalischen Grenzen bei weitem noch nicht ausgeschöpft, so dass für die Zukunft Raum für Verbesserungen bleibt.

Der Vergleich der Kraftwerkskosten mit den entsprechenden Kosten bei ITER zeigt eine gute Übereinstimmung. Neben den Brennstoffkosten - die bei der Fusion vernachlässigbar niedrig sind - und den reinen Betriebskosten gehören dazu die Kosten für den Austausch des Blankets und der Divertorplatten, die während der Betriebszeit des Kraftwerkes mehrfach ausgetauscht werden müssen. Die Anlagenkosten sind jedoch nicht statisch, sondern sinken mit der Zeit durch sogenannte Lerneffekte. Auch die Anlagengröße spielt eine Rolle: Die spezifischen Kosten sind umso niedriger je größer die Anlagen sind, ebenso wenn zwei Anlagen sich die Infrastruktur teilen. Damit dürften die Stromgestehungskosten der Fusion - die Brennstoffgewinnung, Bau, Betrieb und Abbau des Kraftwerks sowie Lagerung der Rückstände berücksichtigen - bei der zehnten Anlage ihrer Art zwischen sechs und zehn Cent pro erzeugter Kilowattstunde liegen.

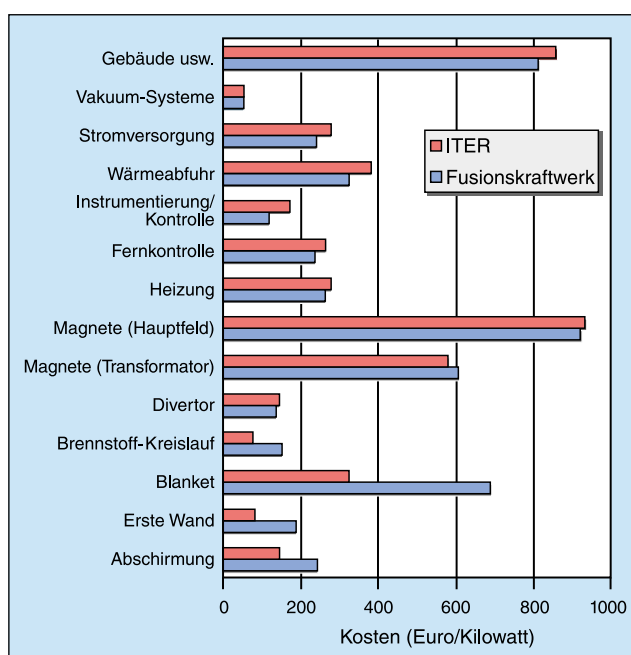
Die Fusion in der künftigen Energiewirtschaft

Die zukünftige Entwicklung der Energiewirtschaft ist aller Wahrscheinlichkeit nach durch eine deutlich steigende Nachfrage von Energie gekennzeichnet. Gründe sind vor allem das Anwachsen der Weltbevölkerung und das stetige Wachstum der wirtschaftlichen Aktivitäten weltweit, das sich wohl über das ganze Jahrhundert erstrecken wird. Steigerungen der Energienachfrage auf das Drei- bis Vierfache des heutigen Wertes scheinen dabei durchaus realis-

tisch zu sein; die Nachfragesteigerung bei elektrischer Energie wird nochmals deutlicher ausfallen.

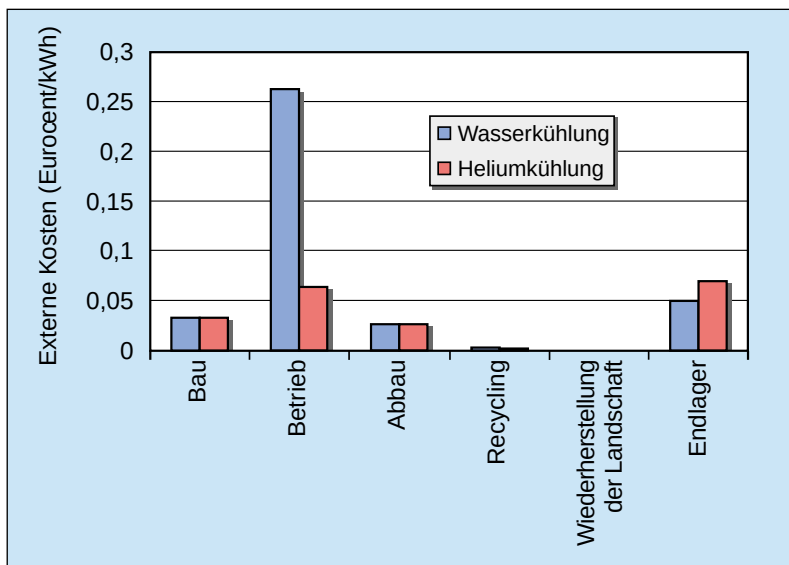
Wie diese Nachfrage unter verschiedenen Randbedingungen befriedigt werden könnte, untersuchte eine detaillierte SERF-Studie des niederländischen Energieinstitutes ECN (Energieonderzoek Centrum Nederland) über die Entwicklung des europäischen Energiemarktes. In einem Rechenmodell wurden Annahmen über die künftige Energienachfrage gemacht, über die Entwicklung der Energieressourcen, über die Entwicklung der Energietechnologien sowie über weitere Faktoren, die den Energiemarkt beeinflussen. Fusionskraftwerke standen in diesem Modell ab dem Jahr 2050 zur Verfügung. Die Dynamik des Modells wird durch eine Optimierung bestimmt, die die Gesamtkosten des Systems minimiert. Dabei werden Kosten, die erst in Zukunft anfallen, diskontiert.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass Fusion als neue und kapitalintensive Technologie nur dann in den europäischen Markt eindringen kann, wenn eine Randbedingung der Energiewirtschaft ist, dass der Ausstoß des Treibhausgases Kohlendioxid deutlich reduziert werden soll. Dann könnte Fusion im Jahr 2100 etwa 20 bis 30 Prozent des europäischen Strombedarfes decken. Hauptkonkurrenten der Fusion sind dabei Kohle und Kernspaltung. Während ein starker Ausbau von Kohle- oder Kernspaltenergie die Ausbreitung der Fusion verhindern würde, entwickeln sich Fusion und Erneuerbare Energien parallel, was sich durch die sehr



Abschätzung der Investitionskosten für die wesentlichen Elemente eines Fusionskraftwerks.

(Quelle: T.C. Hender et al., Fusion Technology, Vol. 30, 12/1996).



Externe Kosten für die Erzeugung von Fusionsstrom. Mit wenigen Tausendstel Euro pro erzeugter Kilowattstunde liegt die Fusion im Bereich erneuerbarer Energietechniken wie Sonne und Wind.

(Quelle: T. Hamacher et al., Fusion Engineering and Design 56-57, 2001, Seite 95-103)

unterschiedliche Charakteristik der Techniken erklärt: Fusion bedient in erster Linie die Grundlast, wofür Wind- und Sonnenkraftwerke wegen ihrer intermittierenden Leistungsabgabe nicht geeignet sind, solange nicht Speicher mit großer Kapazität zur Verfügung stehen.

Die ECN-Studie zeigt, dass Fusion dort die meisten Marktanteile gewinnen wird, wo die geforderte Reduktion der Treibhausgase am striktesten ist. Zwar werden kurz- und mittelfristig Kohlendioxid-Einsparungen möglich, indem Kohle durch Gas ersetzt wird. In der zweiten Jahrhunderthälfte müssen die Gaskraftwerke aber ersetzt werden, wofür sich die Fusion anbietet. Im globalen Blickwinkel wird die Bedeutung der Option Fusion noch deutlicher: In Ländern wie Indien und China sind in den nächsten Jahrzehnten fast nur Kohlekraftwerke geplant. Kraftwerke und Infrastruktur sind auf Lebenszeiten von 30 bis

40 Jahren ausgelegt - zu dieser Zeit soll das Fusionsdemonstrationskraftwerk DEMO mit der Stromerzeugung beginnen.

Fusion in einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Wie lassen sich die Umwelt- und Sicherheitsaspekte eines Fusionskraftwerks (siehe Seite 28) mit den Umwelt- und Sicherheitseigenschaften anderer Energiewandlungstechniken vergleichen? Einen möglichen Ansatz liefert das europäische „ExternE“-Projekt, das mit der Bestimmung der sogenannten „externen Kosten“ unterschiedlicher Technologien eine erste Vergleichsgrundlage schafft. Dabei versteht man unter externen Kosten all jene, die nicht von den eigentlichen Marktteilnehmern getragen werden. Zum Beispiel ist in dem Preis für ein Flugticket, das ein Fluggast kauft, keine Entschädigung für die Anwohner des Flughafens wegen Lärmbelästigung enthalten. Ebenso verursachen die Emissionen von Kraftwerken möglicherweise erhebliche Gesundheitsbeeinträchtigungen, die zwar vom Gesundheitswesen, nicht aber von den Stromkunden bezahlt werden.

Die ExternE-Methode versucht nun, alle Nebenwirkungen einer Energiewandlungstechnik aufzuspüren, ihre Auswirkungen zu beschreiben und schließlich monetär zu bewerten. Als Beispiel können die Schwefel-emissionen eines Kohlekraftwerkes dienen: Zuerst ist zu analysieren, wie viel Schwefeldioxid den Schornstein des Kraftwerkes verlässt, wie sich die Substanz ausbreitet und wo sie niedergeht. Sodann werden die Auswirkungen - Gesundheitsschädigung beim Menschen, Schäden an Fassaden, Auswirkungen auf die Ernte oder einen Wald, etc. -

Leistungsvermessung an einem Solarkraftwerk. Die Stromerzeugungskosten neuer Energiequellen wie Photovoltaik oder Fusion liegen etwas höher als die heutiger Techniken.



Foto: RWE

analysiert. Im letzten Schritt werden diese Schäden dann monetär bewertet. Für die Beeinträchtigung der Ernte ist dies einfach: der Geldwert des Ernteverlustes. Schwieriger ist es, Auswirkungen auf den Menschen oder ein Biosystem zu bewerten. In einem pragmatischen Ansatz versucht man den „Wert“ eines menschlichen Lebens abzuschätzen, indem man untersucht, was Menschen bereit sind auszugeben, um die Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Unfalls herabzusetzen. Ebenso untersucht man Gehaltsstrukturen von Arbeitsplätzen mit erhöhtem Unfallrisiko um so herauszufinden, wie viel Geld ein Arbeitnehmer als Ausgleich für ein höheres Todesrisiko verlangt.

Um die verschiedenen Kraftwerksarten - Kohle, Erdgas, Kernspaltung, Biomasse, Wasser-, Wind- und Solarenergie sowie Fusion - zu vergleichen, wurden alle Auswirkungen im Brennstoff- und Lebenszyklus der jeweiligen Anlagen untersucht. Für die Fusion erstreckte sich diese Analyse von der Gewinnung der Rohbrennstoffe Deuterium und Lithium über die eigentliche Betriebsphase des Kraftwerks bis zur Lagerung der radioaktiven Reststoffe. Die Ergebnisse für



Foto: Norma Neuheiser, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle

die Fusion - externe Kosten im Bereich weniger Zehntel Cent pro erzeugter Kilowattstunde - sind vielversprechend (siehe Abbildung links). Bezüglich der externen Kosten kann die Fusion damit leicht mit erneuerbaren Energietechniken wie Sonne und Wind konkurrieren.

Mit der ExternE-Methode versucht man, Nebenwirkungen einer Energiewandlungstechnik - hier der Landschaftsverbrauch durch die Braunkohlegewinnung - monetär zu bewerten und so vergleichbar zu machen.

Kernfusion - eine internationale Gemeinschaftsaufgabe

Fusionsforschung in Europa

In Deutschland liegt der Schwerpunkt der Fusionsforschung bei der „Entwicklungsgemeinschaft Kernfusion“. Von dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und dem Forschungszentrum Karlsruhe gegründet, werden hier arbeitsteilig Plasmaphysik (IPP) und Fusionstechnologie (FZK) untersucht. Seit 2000 ist auch das Forschungszentrum Jülich Mitglied. Die drei Institute sind zudem im „Programm Kernfusion“ der Helmholtz-Gemeinschaft organisiert. Beiträge zum deutschen Fusionsprogramm liefern außerdem zahlreiche Universitäten.

Die deutsche Fusionsforschung ist seit

ihren Anfängen Teil eines europäischen Forschungsverbundes, in dem die Fusionszentren der Europäischen Union und der Schweiz mit etwa 2000 Wissenschaftlern und Ingenieuren zusammengefasst sind. Koordiniert von der Europäischen Atomgemeinschaft EURATOM mit Sitz in Brüssel, stellen die Partner das europäische Programm auf, beteiligen sich an seiner Finanzierung und kontrollieren seine Ausführung in den arbeitsteilig forschenden nationalen Laboratorien (Abbildung Seite 39). Zusätzlich betreibt Europa seit 1983 ein gemeinsames Großexperiment, den „Joint European Torus“ (JET) im englischen Culham. Dieses weltweit größte Fusionsexperiment hat die Aufgabe, ein Plasma in der Nähe der Zündung zu untersuchen.

Neben dem europäischen Fusionsprogramm existieren weltweit noch drei weitere

eigenständige große Programme in den USA, in Japan sowie in der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS). In kleinerem Umfang betreiben auch andere Länder - so Australien, China und Südkorea - Fusionsforschung. Zwischen den Programmen gibt es zahlreiche Wechselwirkungen. Herausragend ist dabei die seit 1988 bestehende Zusammenarbeit der großen Fusionsprogramme, die gemeinsam den nächsten großen Schritt in der Fusionsforschung, den internationalen Testreaktor ITER planen, der erstmals ein längere Zeit energielieferndes Plasma erzeugen soll.

Historischer Überblick

1929 vermuteten Atkinson und Houtermans, dass Verschmelzungsreaktionen leichter Atome die Energiequelle von Sonne und Sternen seien. Als die Teilchenbeschleuniger genügend hohe Energien erreichen konnten, um im Laboratorium leichte Kerne zur Reaktion zu bringen, gelang es 1934 Rutherford, die Fusion von Deuteronen nachzuweisen. 1939 waren die Kenntnisse bereits so weit gediehen, dass Bethe und Weizsäcker eine quantitative Beschreibung des Fusionszyklus der Sonne geben konnten. Erste Untersuchungen mit dem Ziel, die Kernverschmelzung zur Energiegewinnung auf der Erde nutzbar zu machen, begannen Ende der 40er Jahre, vor allem in den USA, Russland und Großbritannien.

Blickt man von einem der modernen Fusionsexperimente zurück in diese Vergangenheit, so nehmen sich die Anfänge der Fusionsforschung sehr bescheiden aus: Die Plasmen der ersten Experimente waren mit wenigen Litern klein, die Magnet- und Vakuumtechnik war nicht entwickelt, experimentelle Erfahrung und theoretisches Verständnis des Plasmaverhaltens fehlten ebenso wie leistungsfähige Heizapparaturen, ausgefeilte Messverfahren zum Beobachten und schnelle Computer zum Berechnen des komplexen Plasmaverhaltens.

Es ist daher wenig verwunderlich, dass die ersten Einschätzungen

des physikalisch-technischen Problems der Aufgabe nicht gerecht wurden: Wenige Jahre hielt 1952 das für Fusion zuständige amerikanische Kontrollgremium für ausreichend, um zu entscheiden, ob die Kernfusion realisierbar sei. Nur vier experimentelle Schritte sah das Fusionsprogramm des amerikanischen Fusionsforschers Lyman Spitzer in Princeton vor: Der Erfinder des Stellarators wollte mit einem ersten Experiment, Modell A genannt, ein eine Millionen Grad heißes Stellaratorplasma untersuchen. Die kleine Anlage, die auf einem Labortisch Platz fand, ging 1952 in Betrieb. Auf die jeweils größeren und leistungsfähigeren Modelle B und C sollte Modell D folgen, das bereits energieliefernde Fusionskraftwerk. Im Unterschied zu dem ambitionierten Princetoner Programm war man andernorts bescheidener. In Los Alamos zum Beispiel war bereits der Name des dort geplanten Experiments - Perhapatron („Vielleicht-Maschine“) - Ausdruck dieser Vorsicht.

Tatsächlich zeigten sich bald massive Schwierigkeiten und die Hoffnung auf einen schnellen Durchbruch musste aufgegeben werden. Neben normalen technischen Rückschlägen zeigten sich grundlegende Probleme: Zum Beispiel waren die Plasmen durch Wandmaterial stark verunreinigt; die erwarteten Gesetze der klassischen stoßbedingten Diffusion galten überraschend nicht, d.h. die Plasmateilchen verließen den Magnetkäfig wesentlich schneller, als vorhergesehen und überdies zeigten sich eine ganze Reihe verschiedenster Instabilitäten, die den magnetischen Einschluss zerstörten. Ende der 50er Jahre setzte sich daher die Erkenntnis durch, dass zur Entwicklung der Fusion ein Langzeitprogramm mit intensiver Grundlagenforschung nötig sei. Die theoretischen und experimentellen Arbeiten wurden nun sehr breit angelegt und mit einer Vielzahl von Anlagentypen - lineare und ringförmige Pinche verschiedenster Bauart, Stellaratoren, Multipole, Spiegelmaschinen, usw. - experimentiert. Schwerpunkt war zunächst die Suche nach geeigneten Magnetfeldkäfigen, die ein Plasma stabil und wärmeisoliert einschließen können. In Deutschland begannen Überlegungen zu einer Ausweitung der Fusionsforschung Ende der 50er Jahre.

Trotz beachtlicher Kenntnisfortschritte blieben die experimentellen Resultate während der 60er Jahre weltweit unbefriedigend: Fast alle Anlagentypen litten unter Instabilitäten und zeigten einen zu starken Teilchenverlust - die berühmte Bohm-Diffusion. Eine der wenigen Ausnahmen war

WENDELSTEIN 1a,
der erste Stellarator
im IPP, ging 1960 in
Betrieb (vorne),
rechts hinten:
WENDELSTEIN 1b,
links: **WENDELSTEIN 4.**





Fusionslaboratorien in Europa

- | | |
|---|---|
| <p>1 Niederlande</p> <ul style="list-style-type: none"> - Instituut voor Plasmafysica, Nieuwegein - NRG (Energy Research Foundation ECN - KEMA) <p>2 Culham Laboratory, United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), Abingdon, Großbritannien</p> <p>3 Irland</p> <ul style="list-style-type: none"> - Universität Dublin, Irland - Dublin Institute for Advanced Studies - University College Cork, <p>4 EFDA - The European Fusion Development Agreement, Garching, Deutschland</p> <p>5 ITER - European Joint Work Site, Garching, Deutschland</p> <p>6 Belgien</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ecole Royale Militaire, Plasma Physics Laboratory, Brüssel - Université Libre de Bruxelles - Centre d'étude de l'Energie Nucléaire, Mol <p>7 Le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Departement de Recherches sur la Fusion Contrôlée, Cadarache, Frankreich</p> <p>8 Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), Italien</p> <ul style="list-style-type: none"> - Centro Ricerche Energia, ENEA, Frascati - Istituto di Fisica del Plasma, CNR, Mailand - Consorzio RFX, Padua <p>9 Naturvetenskapliga Forskningsrådet, Stockholm, Schweden</p> <ul style="list-style-type: none"> - Royal Institute of Technology, Alfvén Laboratory, Stockholm - Chalmers University of Technology, Göteborg <p>10 National Technology Agency (TEKES), Helsinki, Finnland</p> <p>11 Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark</p> <p>12 Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Deutschland</p> <ul style="list-style-type: none"> - Garching - Teilinstitut Greifswald | <ul style="list-style-type: none"> - Bereich Berlin <p>13 Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Plasmaphysik, Jülich, Deutschland</p> <p>14 Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Programm Kernfusion, Karlsruhe, Deutschland</p> <p>15 Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Schweiz</p> <p>16 Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW), Wien</p> <ul style="list-style-type: none"> - Technische Universität Wien - Universität Innsbruck - Österreichisches Forschungszentrum, Seibersdorf - Technische Universität Graz <p>17 Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spanien</p> <p>18 Instituto Superior Técnico, Technische Universität Lissabon, Lissabon, Portugal.</p> <p>19 Griechenland</p> <ul style="list-style-type: none"> - National Technical University of Athens, Athen - Demokritos, National Centre for Scientific Research, Athen - The University of Ioannina, Greece - Foundation for Research and Technology - Hellas <p>20 The Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Ungarn</p> <ul style="list-style-type: none"> - Budapest University of Technology and Economics, Budapest <p>21 Tschechien</p> <ul style="list-style-type: none"> - Academy of Sciences of the Czech Republic, Prag - Czech Technical University, Prag - Charles University Prag - J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry, Prag <p>22 Agentia Nationala pentru Stiinta, Tehnologie si Inovare, Rumänien</p> |
|---|---|

der kleine WENDELSTEIN-Stellarator in Garching, das „Munich mystery“. Ende der 60er Jahre meldeten dann sowjetische Fusionsforscher außerordentlich gute Ergebnisse ihres Tokamak-Experimentes T3. Die russische Erfindung sollte wesentlich bessere Einschluss- und Stabilitätseigenschaften besitzen als alle bisherigen Konfigurationen. Auch die erreichten Plasmatemperaturen waren erheblich höher. Nach anfänglichen Zweifeln an den russischen Angaben bestätigte ein englisches Team, das nach Russland gereist war und nachgemessen hatte, die Angaben. Diesem Wissenschaftlerteam stand ein damals neues Hilfsmittel zur Bestimmung von Temperatur und Dichte im Plasma zur Verfügung - ein leistungsstarker Laser. Die Bestätigung war der Auslöser für ein weltweites Tokamak-Fieber. Schnell entstanden überall neue Tokamaks. Auch das bisherige Stellaratorzentrum der USA, Princeton, stellte sich um und verwandelte seinen glücklosen C-Stellarator in einen Tokamak.

Die gewonnenen Erfahrungen führten schließlich in den 70er Jahren zu einer

Konzentration der Arbeitsgebiete und zu größeren, leistungstärkeren Experimenten. Der Tokamak setzte sich dabei als weltweit führender Experimenttyp durch. Mit seiner Hilfe wurden zunächst die zentralen physikalischen Fragen - insbesondere Einschluss und Aufheizung eines Fusionsplasmas - untersucht. Ein wesentlicher Erfolg war 1982 die Entdeckung des H-Regimes - ein Plasmazustand mit besonders guter Wärmeisolation - am Tokamak ASDEX in Garching. Große Tokamakexperimente wurden während der folgenden Jahrzehnte in den USA, Japan und vor allem in Europa gebaut, wo JET, der Joint European Torus, 1983 in Betrieb ging. 1991 gelang es hier, in einem zunächst noch „verdünnten“ Deuterium-Tritium-Plasma über ein Megawatt an Fusionsleistung zu erzeugen. Zum zweiten Mal gelang dies Ende 1993 mit dem amerikanischen Fusionsexperiment TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) in Princeton, das rund sechs Megawatt Fusionsleistung freisetzte und sich später auf zehn Megawatt steigern konnte. 1997 schließlich gelang JET die Erzeugung von 14 Megawatt

**Wichtigste laufende
und geplante Fusions-
experimente des
Europäischen
Fusionsprogramms**

Experiment	Typ	Laboratorium	Aufgabe	Betriebs- beginn
JET	Tokamak	Europäisches Gemeinschafts- unternehmen	Plasmaphysik in der Nähe der Zündung	1983
TEXTOR-94	Tokamak	Forschungszentrum Jülich (D)	Plasma-Wand- Wechsel- wirkung	1982
TORE SUPRA	Tokamak	CEA Cadarache (F)	Test supraleitender Spulen, stationärer Betrieb	1988
FT-Upgrade	Tokamak	ENEA Frascati (I)	Plasmaphysik bei hohen Dichten	1989
ASDEX Upgrade	Tokamak	IPP Garching (D)	Plasmaphysik unter kraftwerksähnlichen Bedingungen, ITER-Vorbereitung	1991
WENDELSTEIN 7-AS	Stellarator	IPP Garching (D)	Test der Prinzipien des „Advanced Stellarator“	1988
WENDELSTEIN 7-X (im Bau)	Stellarator	IPP-Teilinstitut Greifswald (D)	Test der Kraftwerks- tauglichkeit des „Advanced Stellarator“	ca. 2010
ITER (geplant)	Tokamak	Internationales Gemeinschafts- unternehmen	Testreaktor, brennen- des Plasma, Technologie- Erprobung	ca. 2014

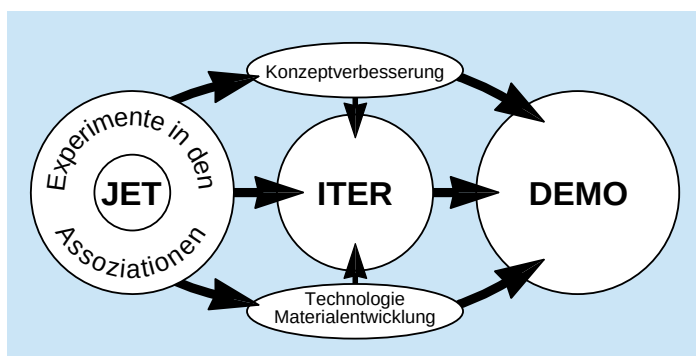
Fusionsleistung für zwei Sekunden; 65 Prozent der zum Heizen aufgewandten Leistung wurden dabei per Fusion zurückgewonnen.

Neben den Tokamaks wurde in geringerem Umfang auch mit anderen Experimententypen gearbeitet, von denen sich in den letzten Jahren der Stellarator als besonders leistungsfähig erwiesen hat.

Nach dem schweren Rückschlag für die Stellaratoren in den 60er Jahren konnte 1980 das Experiment WENDELSTEIN 7-A weltweit zum ersten Mal das Stellaratorprinzip erfolgreich mit einem heißen Plasma demonstrieren. „Garching shows stellarators may be good after all“, meinte damals die Zeitschrift „Physics Today“: „Stellarators appear to be back in business.“ Aufbauend auf diesen Erfolgen wird im IPP das Experiment WENDELSTEIN 7-AS betrieben, das 1988 in Betrieb ging. Der verbesserte Nachfolger WENDELSTEIN 7-X, der die Kraftwerkstauglichkeit der Stellaratoren zeigen soll, entsteht gegenwärtig im IPP-Teilinstitut Greifswald. Er soll die Stellaratoren als leistungsfähige Alternative auf das Niveau der bislang bevorzugten Tokamaks heben. Gelingt dies, dann könnte das Demonstrationskraftwerk, das auf den in internationaler Zusammenarbeit geplanten Tokamak-Experimentalreaktor ITER folgen soll, auch ein Stellarator sein.

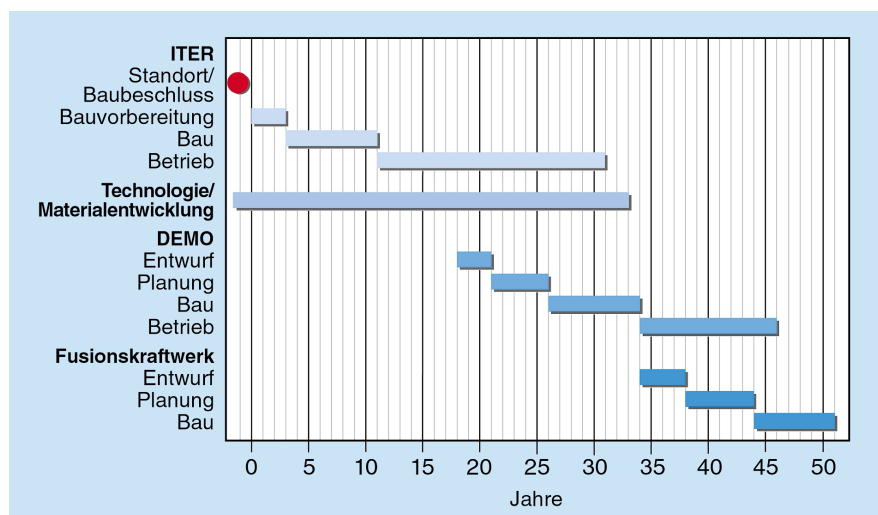
Nachdem die großen Fortschritte der Plasmaphysik in den letzten Jahren die physikalischen Probleme eines Fusionskraftwerks als lösbar erscheinen lassen, wird die Bearbeitung technischer Fragestellungen verstärkt. Schlüsselprobleme sind hier Materialentwicklung und Konzeption der „ersten“, das Plasma unmittelbar umgebenden Wand, die Entwicklung geeigneter Blanketmaterialien und der Tritiumtechnologie sowie der Bau großer supraleitender Magnete. Ebenso wichtig ist die Erforschung der Sicherheits- und Umweltfragen der Fusion. Diese technologischen Fragen werden in Europa in einem eigenen Technologieprogramm bearbeitet sowie in Zusammenhang mit der weltweiten ITER-Zusammenarbeit. ITER soll zeigen, dass es physikalisch und technisch möglich ist, durch Kernverschmelzung Energie zu gewinnen.

Parallel zu ITER wird an der Verbesserung



Die Struktur des Europäischen Fusionsprogrammes

des zugrundeliegenden Tokamakkonzeptes - vor allem in Hinblick auf den Dauerbetrieb - gearbeitet. Zusammen mit den Ergebnissen der Stellaratorforschung werden diese Arbeiten sowie die experimentellen Erfahrungen mit einem brennenden Plasma, die ITER liefern soll, dann in die Planung des Demonstrationskraftwerks DEMO einfließen. Er soll bereits alle Funktionen eines energiegewinnenden Kraftwerks erfüllen, ohne allerdings wirtschaftlich arbeiten zu müssen. Falls die Fusionsforschung nach diesem Plan voranschreitet, könnte - angesichts der für ITER und seinen Nachfolger DEMO nötigen Planungs-, Bau- und Betriebszeit - die Fusionsenergie etwa in der Mitte des Jahrhunderts wirtschaftlich nutzbar sein.



Zeitplan der Fusionsforschung beginnend mit dem Baubeschluss für ITER über DEMO bis zum ersten Fusionskraftwerk

Fusions- forschung IPP



5 Module mit 8 Modultiefen, davon vier als getriggerte Spulen
10 Windungen à 12 Leitern
davon 8 Cu-Leitern und 4 Al-Leitern
mittl. Spulenradius 0,50 - 1,40 m
Spitzenstrom 17 kA, Stromdichte 27 MA/m²
Außenradius 5 m
Zelltemperatur 40 °C, Energiegehalt 100 MJ
10 Tl. Induktionspulen
12 Tl. Windungen, mittl. Spulenradius 0,50 m
Temperaturbereich 30 - 200 °C
Leistung 100 C

Tokamaks

Fusionsexperimente vom Typ Tokamak, Anfang der 50er Jahre in der Sowjetunion entwickelt, wurden bald weltweit zum führenden Experimenttyp der Fusionsforschung. Schwerpunkt der Tokamak-Aktivitäten des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik ist das Experiment ASDEX Upgrade. Es ging 1991 in Betrieb, nachdem ein Jahr zuvor der Vorgänger - das „Axialsymmetrische Divertor-Experiment“ ASDEX - nach zehnjähriger, überaus erfolgreicher Experimentierzeit stillgelegt worden war. ASDEX hatte das Ziel, mit Hilfe eines Divertors saubere Plasmen zu erzeugen und seine Bedeutung für ein zukünftiges Fusionskraftwerk zu prüfen. Tatsächlich konnte das Experiment zeigen, dass ein Divertor das Plasma nicht nur sauberhalten kann, sondern auch zu einer bedeutenden Verbesserung der Energieeinschlusszeiten führt.

Der Nachfolger ASDEX Upgrade soll den Divertor in einer Form untersuchen, wie er auch in einem Kraftwerk einsetzbar wäre. Von der Divertor- und Randschichtphysik hat sich das Arbeitsfeld von ASDEX Upgrade im Laufe der Zeit auf das Plasmazentrum ausgedehnt. Aufbau und wesentliche Plasmeeigenschaften der Anlage sind einem späteren Kraftwerk angepasst. Sie ist damit insbeson-

dere zur Vorbereitung des in weltweiter Zusammenarbeit geplanten Testreaktors ITER geeignet. Das Arbeitsprogramm für ASDEX Upgrade wird durch ein europäisches Programmkomitee aufgestellt, so dass Forscher aus ganz Europa die Anlage für ihre Experimente nutzen können.

Abgesehen von der Zuarbeit durch ASDEX Upgrade wirken Wissenschaftler des IPP auch direkt an der Vorbereitung des internationalen Experimentalreaktors ITER mit. Der Tokamak soll erstmals ein energielieferndes Plasma erzeugen und zugleich technische Komponenten eines Fusionskraftwerks untersuchen. Seit 1988 ist das IPP in Garching Gastgeber der internationalen ITER-Planungsgruppe.

Daneben beteiligt sich das IPP intensiv an dem wissenschaftlichen Programm des Tokamaks JET (Joint European Torus), dem europäischen Gemeinschaftsexperiment im englischen Culham. Das Plasma dieser weltweit größten Fusionsanlage kommt in vielem bereits einem Kraftwerksplasma nahe. Im Deuterium-Tritium-Betrieb hat JET 1997 kurzzeitig eine Fusionsleistung von 16 Megawatt erzeugt und dabei 65 Prozent der zur Plasmaheizung verbrauchten Energie als Fusionsenergie zurückgewonnen.

**Blick in das
Plasmagefäß des
Fusionsexperiments
ASDEX Upgrade**

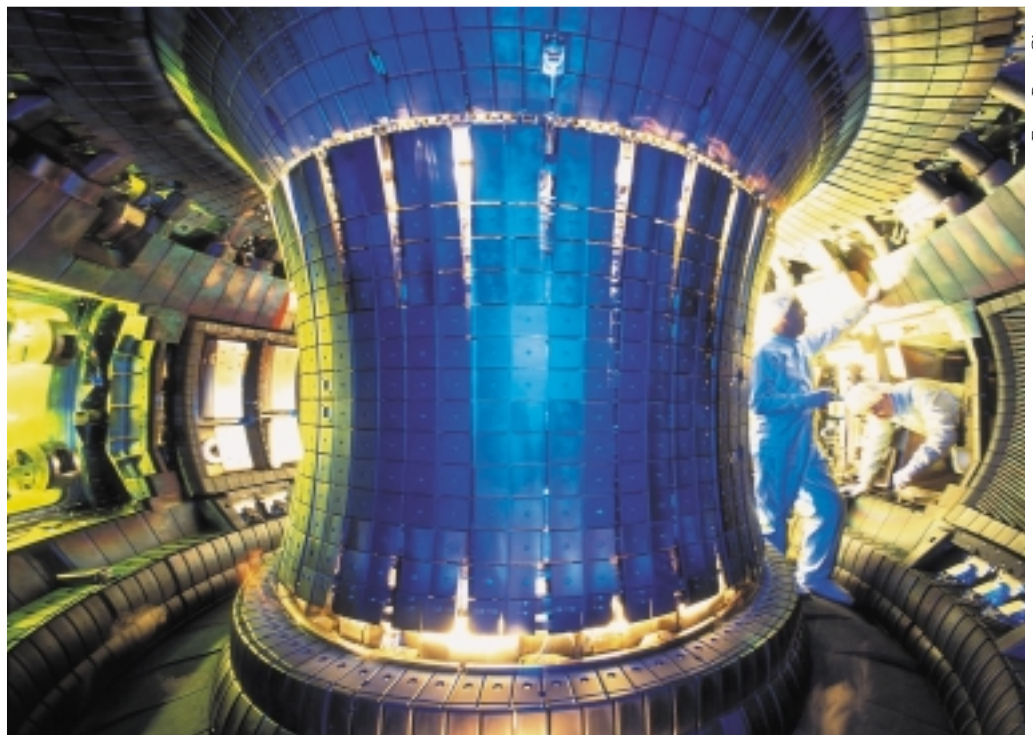
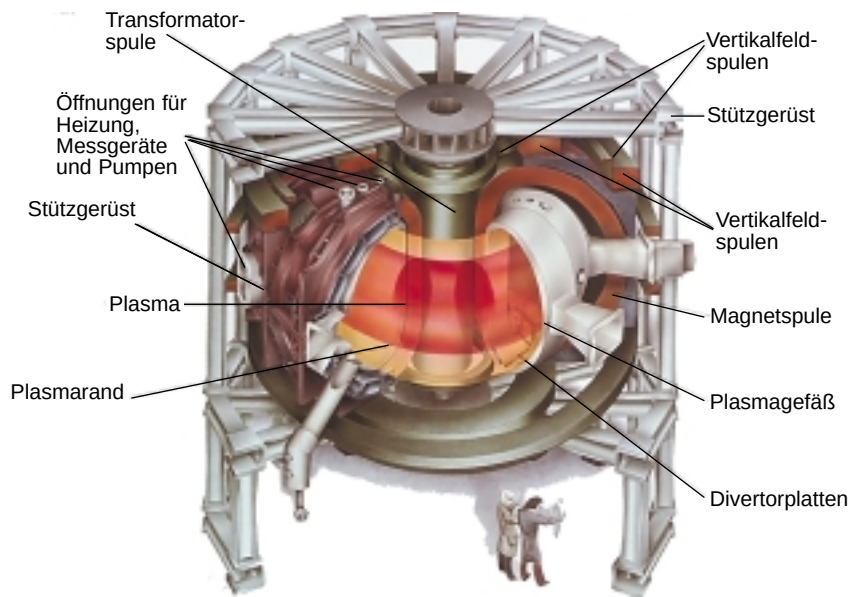


Foto: Peter Ginter



Aufbau von ASDEX Upgrade (aufgeschnitten) mit Plasmagefäß, Hauptfeldmagneten, Poloidalfeldspulen und Stützgerüst.

Fusionsexperiment ASDEX Upgrade

Das Tokamakexperiment ASDEX Upgrade, die gegenwärtig größte Fusionsanlage in Deutschland, ging 1991 im IPP in Betrieb. Eine der Aufgaben des Experiments ist es, die Wechselwirkung zwischen dem heißen Plasma und den Gefäßwänden unter bereits kraftwerksähnlichen Bedingungen zu untersuchen. Obwohl der heiße Plasmaring im Inneren des Gefäßes von magnetischen Kräften in Schwebe gehalten wird, gerät das Plasma an seinem Außenrand dennoch in Kontakt mit den umgebenden Wänden. Dies kann zur Folge haben, dass Material von der Wand abgetragen wird, in das Plasma eindringt, es verunreinigt und abkühlt.

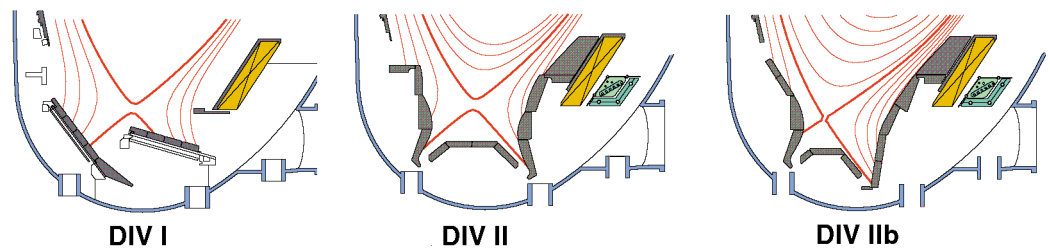
Weiterhin wird an ASDEX Upgrade die gleichzeitige Optimierung der zentralen Plasmaeigenschaften wie Isolationsgüte und Stabilität unter Berücksichtigung der Teilchen- und Wärmeabfuhr untersucht. Obwohl nämlich moderne Tokamakexperimente die für ein Kraftwerk notwendigen Isolations- und Stabilitätseigenschaften punktuell bereits demonstrieren konnten, gelingt ein „integriertes“ Szenario, das alle Anforderungen gleichzeitig erfüllt, noch nicht. Zu diesem Zweck untersucht ASDEX Upgrade zwei mögliche Entladungstypen, das sogenannte „ELMy H-mode-Szenario“, das einen konventionellen Ansatz für den Betrieb eines Fusionskraftwerks darstellt, sowie das fortschrittliche

„Advanced Tokamak-Szenario“, das auf lange Sicht die hauptsächliche Beschränkung der Tokamaks, den gepulsten Betrieb, aufheben soll.

Einen Weg, Teilchen- und Energieabfuhr aus dem Plasma zu kontrollieren, zeigte das Experiment ASDEX (Axialsymmetrisches Divertor-Experiment), das von 1980 bis 1990 im IPP betrieben wurde. Spezielle Spulen erzeugten hier ein zusätzliches Magnetfeld, das Divertorfeld. Es lenkt („divertiert“) die gesamte äußere Randschicht des Plasmas in einen separaten Bereich des Plasmagefäßes, den Divertor. Eine geschlossene Magnetfeldfläche, die Separatrix, verhindert den Kontakt des inneren, heißen Plasmas mit der Gefäßwand und trennt den inneren Einschlussbereich vom äußeren offenen Plasma (siehe Abbildung Seite 24). Die Plasmateilchen des offenen Bereichs werden in den Divertor gelenkt. Sie treffen dort abgekühlt und vom heißen Plasmazentrum entfernt auf Prallplatten auf und werden abgepumpt. Ebenso können störende Verunreinigungen - in einem brennenden Plasma auch die „Fusionsasche“ Helium - aus dem Plasma entfernt werden. Zugleich wird die Gefäßwand geschont.

Überraschend wurde mit ASDEX auch ein Ausweg für ein grundlegendes Problem des magnetischen Plasmaeinschlusses entdeckt, nämlich die an allen Experimenten beobachtete Abnahme der Energieeinschlusszeit mit zunehmender Heizleistung: Unvermeidbar hat die Annäherung der Temperatur an die Zündbedingungen ein Absinken der Wärmeisolation zur Folge. 1982 wurde nun mit Hilfe

Die verschiedenen Divertoranordnungen von ASDEX Upgrade



der Divertoranordnung an ASDEX ein Plasmazustand mit guter Wärmeisolation des Brennstoffes entdeckt. Er wurde H-Regime (High Confinement Regime) getauft. Dieses Entladungsszenario ist auch heute noch die Grundoption für den Betrieb eines zukünftigen Fusionskraftwerks.

Das Divertor-Konzept erwies sich als so leistungsfähig, dass mittlerweile alle modernen Fusionsexperimente das ASDEX-Prinzip übernahmen oder entsprechend modifizierten. Nicht zuletzt wurde das europäische Gemeinschaftsexperiment JET für Divertorbetrieb umgestaltet. Die größten Erfolge hatte die Fusionsforschung mit JET, seit es in der Divertorkonfiguration und im H-Regime arbeitet. Diese Betriebsweise ist auch für den geplanten Internationalen Testreaktor ITER vorgesehen.

Die von ASDEX erfolgreich begründete Divertorlinie des IPP wird seit 1991 mit dem Nachfolger ASDEX Upgrade fortgesetzt, in dem das einfache Divertorkonzept von ASDEX den Erfordernissen eines Fusionskraftwerks angeglichen wurde. Im Gegensatz zum Vorgänger sind dabei auch wesentliche Plasmaeigenschaften, vor allem die Plasmadichte und die Belastung der Wände, den Verhältnissen in einem späteren Kraftwerk angepasst. Durch genügend hohe Heizleistung wird dafür gesorgt, dass die Energieflussdichten durch die Randschicht des

Plasmas denen im Fusionskraftwerk entsprechen. Außerdem wurde das Experiment so dimensioniert, dass in der auf Kraftwerksmaße vergrößert gedachten Anlage Blanket und erste Wand innerhalb der Magnetspulen Platz fänden. Damit kann ASDEX Upgrade trotz seiner kleineren Abmessungen wesentliche Randschichteigenschaften ausreichend simulieren, die in ITER sowie in einem Kraftwerksplasma auftreten werden.

Die unmittelbare Übertragung der bewährten Betriebsweise des H-Regimes auf ITER ist wegen der hohen Fusionsleistungen jedoch nicht problemlos: Von der insgesamt im Kraftwerk erzeugten Fusionsleistung wird zwar der Hauptteil von den entstehenden Fusionsneutronen großflächig auf den Wänden des Plasmagefäßes abgeladen. Die eng gebündelt in den Divertor strömenden Plasmateilchen bringen aber dennoch wesentlich mehr Leistung auf die begrenzte Fläche der Divertorplatten, als diese ohne Zerstörung aushalten können.

Eine mögliche Lösung dieses Problems hat - nach Vorarbeiten am Jülicher TEXTOR-Experiment - ASDEX Upgrade 1994 vorgeführt: Damit nicht die gesamte Energie in Form von Plasmateilchen auf die Divertorplatten einprasselt, wurden in die Randschicht des Plasmas gezielt Verunreinigungen - Atome des Edelgases Neon - eingeblasen. Durch den Kontakt mit dem heißen Plasma werden sie zum Leuchten angeregt und schaffen so die Energie auf sanfte Weise und über die ganze Gefäßwand verteilt als Ultraviolett- oder Röntgenlicht aus dem Plasma. Anders als im heißen Plasmazentrum, wo diese abkühlende Wirkung vermieden werden muss, sind Verunreinigungen am Rand des Plasmas äußerst nützlich: Bevor die Plasmateilchen auf den Divertorplatten ankommen, haben sie ihre Energie bereits an die Neonatome verloren. Die Wärmeisolation dieses Plasmazustandes entspricht außerdem

Charakteristische Daten des Experimentes ASDEX Upgrade

Radius der Anlage (über alles):	5 Meter
Höhe (über alles):	9 Meter
Gewicht:	800 Tonnen
Großer Plasmaradius:	1,65 Meter
Plasmahöhe:	1,60 Meter
Plasmabreite:	1,00 Meter
Plasmavolumen:	13 Kubikmeter
Plasmagewicht:	0,003 Gramm
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	16
Spulenstrom:	84 Kiloampere
Magnetfeld:	max. 3,90 Tesla
Plasmastrom:	max. 1,4 Megaampere
Entladungsdauer:	bis 10 Sekunden
Heizleistung:	
- Neutral-Injektion:	20 Megawatt
- Ionen-Zyklotronheizung:	8 Megawatt
- Elektronen-Zyklotronheizung:	2 Megawatt

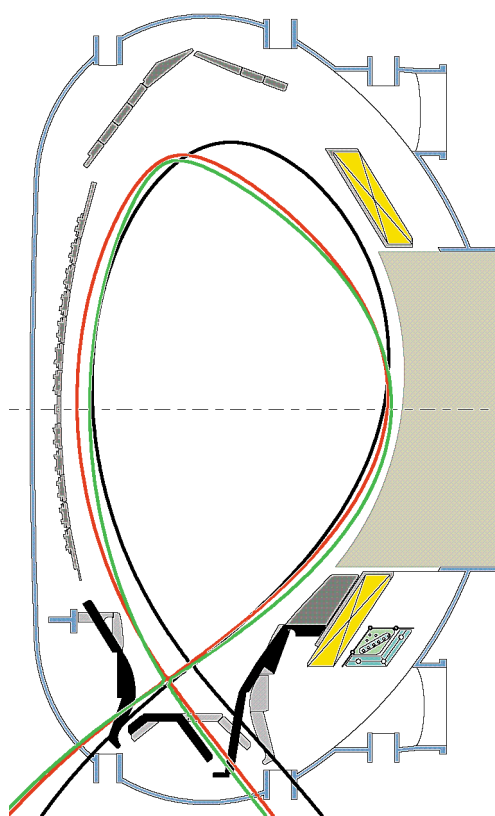
annähernd den günstigen Werten des H-Regimes.

Ein zusätzlicher Vorteil: Im H-Regime wirken Rand-Instabilitäten des Plasmas, sogenannte ELMs (Edge Localized Modes) besonders belastend für die Divertorplatten, weil sie Plasmateilchen und -energien gebündelt und schlagartig auf die Platten werfen. Andererseits sorgen sie damit auch für das Ausschleudern von Verunreinigungen aus dem Plasma. Statt der starken ELM-Einschläge des H-Regimes wünscht man sich deshalb schwächere und dafür häufigere ELMs. Genau dies ist in Experimenten mit strahlender Randschicht festzustellen. Allerdings zeigten Versuche, dieses Regime auch am derzeit größten Fusionsexperiment JET in Culham zu verwirklichen, dass sich die günstigen Wärmeisolationseigenschaften nicht ohne weiteres auf künftige Experimente übertragen lassen. Daher werden an ASDEX Upgrade auch andere Möglichkeiten der sanften Teilchen- und Leistungsauskopplung untersucht.

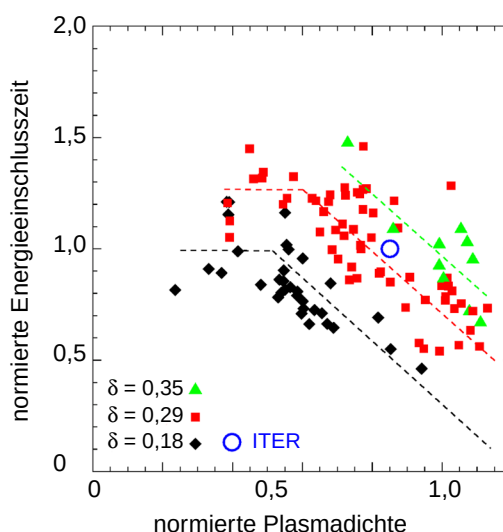
Eine weitere Möglichkeit, die auf die Prallplatten auftreffende Leistung zu handhaben, ist nämlich die bessere Gestaltung des Divertors selbst. Durch eine optimierte geometrische Form und Anordnung der Prallplatten kann man das Neutralgas in der Divertorkammer so steuern und an der energieführenden Schicht des Plasmas konzentrieren, dass ein Teil der Leistung von den neutralen Atomen absorbiert und großflächig verteilt wird. Dadurch werden die Prallplatten spürbar entlastet. Außerdem können Strömungen so aufgebaut werden, dass die Verunreinigungen im Divertorbereich konzentriert werden und bevorzugt dort Energie abstrahlen. Solche Überlegungen, unterstützt durch aufwändige Computersimulationen, führten zur Ausarbeitung eines neuen Divertorkonzepts für ASDEX Upgrade. Dieser sogenannte „Divertor II“ wurde im Sommer 1996 in die Anlage eingebaut und im Herbst 2000 als „Divertor IIb“ so modifiziert, dass Plasmaquerschnitte mit erhöhter Dreieckigkeit in den Divertor eingepasst werden können (Abbildung Seite 46). Mit diesem Konzept konnte die Belastung der Divertorplatten deutlich verringert werden. Der Erfolg erhöht auch die Glaubwürdigkeit der verwendeten Computerprogramme im Hinblick auf die Modellierung zukünftiger Anlagen.

Zusätzlich untersucht man an ASDEX Upgrade unterschiedliche Wandmaterialien, die den Leistungs- und Teilchenflüssen in

einem Kraftwerk standhalten können. Neben dem an vielen Fusionsanlagen eingesetzten Kohlenstoff, der sich durch hervorragende thermische und mechanische Eigenschaften auszeichnet, wurden an ASDEX Upgrade auch sehr erfolgreich Wolframbeschichtung des Divertors und der inneren Wand untersucht. Wolfram ist in seinen thermischen und mechanischen Eigenschaften dem Kohlenstoff noch überlegen und kann darüber hinaus, im Gegensatz zu Kohlenstoff, nur wenig Wasserstoff binden, was sich in einem

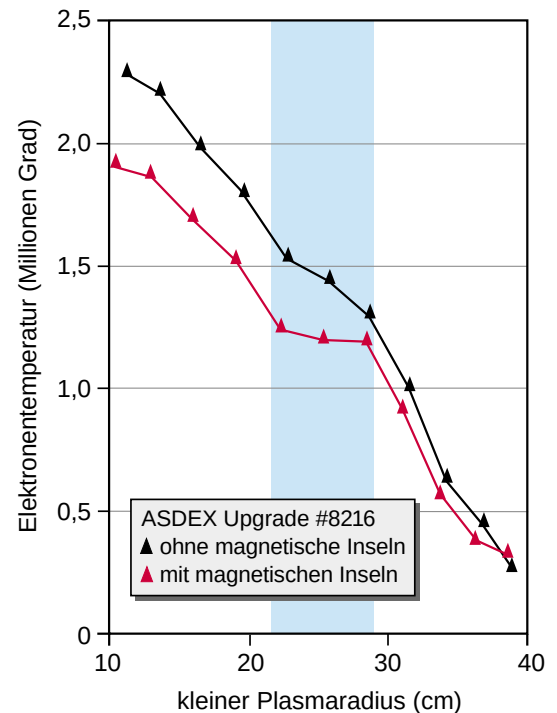
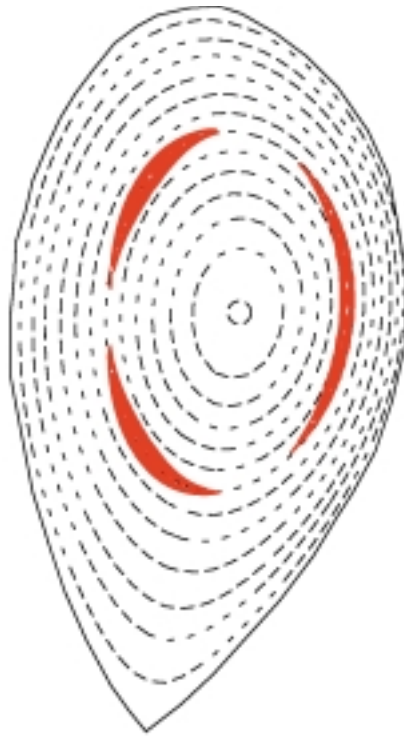


Querschnitt durch das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade. Eingezeichnet sind Plasmen verschiedener „Dreieckigkeit“ des Plasmaquerschnitts. Durch die Erhöhung der „Dreieckigkeit“ kann gute Wärmeisolation auch bei hoher Plasmadichte aufrechterhalten werden.



Bei niedriger Dreieckigkeit δ (schwarzer Plasmaquerschnitt oben und schwarze Punkte links) nimmt die Energieeinschlusszeit mit steigender Plasmadichte bereits vor Erreichen des Reaktorzielwerts ab. Plasmen mit hoher Dreieckigkeit (rote und grüne Kurven bzw. Punkte) besitzen dagegen auch bei hoher Plasmadichte ausreichende Isolationsgüte.

Links: Plasmaquerschnitt von ASDEX Upgrade mit magnetischen Inseln (rot). Das Diagramm rechts zeigt den Verlauf der Elektronentemperatur mit und ohne Inseln. Die beim Plasmaradius 22 bis 29 Zentimeter auftretenden Inseln (blauer Bereich) führen zu einem deutlich flacheren Temperaturprofil. Dadurch nimmt auch die Zentraltemperatur ab.



Kraftwerk günstig auf das Tritiuminventar auswirken würde. Jedoch können Wolframverunreinigungen in wesentlich geringerem Maße als Kohlenstoff im Plasma geduldet werden, da Wolfram zu starken Abstrahlungsverlusten führt. Es hat sich aber gezeigt, dass in Verbindung mit der sanften Wärmeabfuhr im Divertor nur wenige Wolframatome an den Prallplatten losgelöst werden und ins Plasma eindringen können. Wolfram steht damit als ernsthafter Kandidat zur Wandauskleidung in künftigen Fusionsanlagen zur Verfügung.

Der Veränderung des Divertors von Version II zu IIb liegt die Erkenntnis zugrunde, dass mit der gezielten Formung des Plasmaquerschnitts deutliche Fortschritte auf dem Weg zu einem kraftwerkstauglichen integrierten Entladungsszenario erzielbar sind. So war es durch die Erhöhung der „Dreieckigkeit“ des Plasmaquerschnitts erstmals möglich, die vom H-Regime bekannte Isolationsgüte auch bei hoher Plasmadichte aufrechtzuerhalten: Während bei niedriger Dreieckigkeit die Wärmeisolation mit steigender Plasmateildichte bereits vor Erreichen des für ein Kraftwerk notwendigen Wertes abnimmt, besitzen Plasmen mit hoher Dreieckigkeit auch bei kraftwerksrelevanter Plasmadichte ausreichende Isolationsgüte (Abbildungen Seite 47). Zusätzlich ist in diesem Betriebsbereich die Belastung der Prallplatten - durch das Auftreten kleiner ELMs mit nahezu kontinuierlicher Leistungsbeaufschlagung der Platten - besonders günstig.

Man nähert sich damit einem Entladungsszenario mit ausreichender Isolationsgüte bei hoher Plasmadichte und akzeptablen Leistungsflüssen auf die Divertorplatten. Eine weitere Bedingung für ein Fusionskraftwerk ist allerdings die Effizienz des magnetischen Einschlusses: Einerseits muss die im Plasma gespeicherte Energie möglichst groß sein, da dies hohe freisetzbare Fusionsleistung bedeutet. Andererseits sollte die dazu benötigte Magnetfeldenergie möglichst gering sein, da das Magnetfeld von supraleitenden Spulen erzeugt werden muss, die die Kosten der Anlage wesentlich bestimmen. Das Verhältnis von thermischer Plasmaenergie zu magnetischer Energie bezeichnet man als Plasma-Beta (siehe Seite 11). Hohes Beta bedeutet also effiziente Nutzung des Magnetfeldes.

Es zeigt sich jedoch, dass die Beta-Werte nicht beliebig erhöht werden können, da bei hohem Beta im Plasma Instabilitäten auftreten. Theoretische Arbeiten sagen für Tokamaks und Stellaratoren eine Beta-Grenze bei einigen Prozent vorher. Zur Vorbereitung von ITER ist es daher ein wichtiges Untersuchungsziel, sowohl den maximal erreichbaren Beta-Wert zu ermitteln als auch einen stabilen Arbeitspunkt mit möglichst hohem Beta zu demonstrieren. Mit seiner ITER-ähnlichen Geometrie ist ASDEX Upgrade für solche Untersuchungen gut geeignet. Obwohl an der Anlage gezeigt werden konnte, dass stationäre Entladungen bei dem von ITER angestrebten Beta-Wert ohne

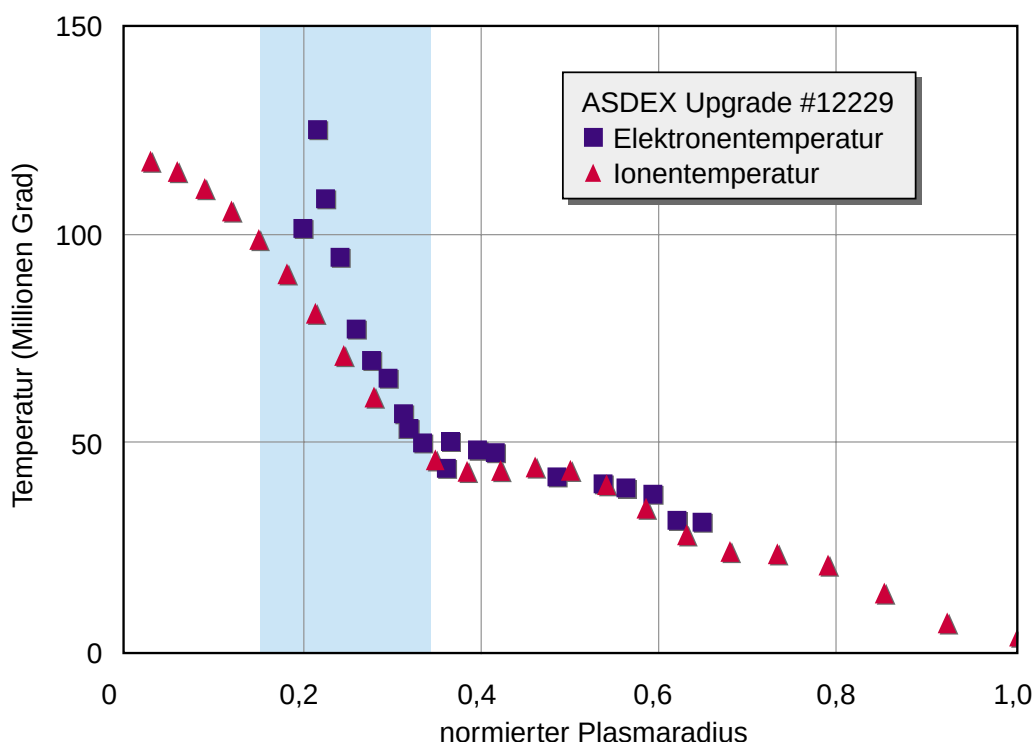
Plasmainstabilitäten möglich sind, findet man doch in der Nähe des ITER-Arbeitspunktes eine spezifische Art von Instabilitäten - sogenannte magnetische Inseln - die sich negativ auf den Plasmaeinschluss auswirken. Dies zeigt die Abbildung links. Magnetische Inseln sind in sich geschlossene Strukturen magnetischer Flächen, die verschiedene radiale Bereiche des Plasmas mit Magnetfeldlinien verbinden und somit für die Wärmeisolation einen Kurzschluss darstellen. Da zudem nicht klar ist, wie sich diese Ergebnisse auf ITER übertragen lassen, ist es wünschenswert, eine aktive Kontrollmethode zu entwickeln, die magnetische Inseln vermeidet oder beseitigt.

Dies wurde an ASDEX Upgrade 1999 demonstriert: Durch gezieltes Einstrahlen elektromagnetischer Wellen bei der Elektronen-Zyklotron-Resonanzfrequenz mit einer Leistung von weniger als zehn Prozent der gesamten Heizleistung konnten im Plasma lokale Ströme getrieben werden, welche die unerwünschten Inseln zerstören und den ursprünglichen Zustand mit guter Wärmeisolation wieder herstellen. Diese Methode könnte auch in ITER oder einem Kraftwerk den Betrieb bei ausreichend hohen Beta-Werten gewährleisten.

Neben dem H-Mode-Szenario mit ELMs wird seit einigen Jahren noch eine weitere Betriebsweise für Tokamaks untersucht. Bei diesem „Advanced Tokamak-Szenario“ versucht man, sich den sogenannten „Bootstrap-

Strom“ zu Nutze zu machen. Dieser durch einen thermoelektrischen Effekt getriebene Ringstrom ist um so stärker, je größer das Plasma-Beta ist. Daher ist es denkbar, bei ausreichend hohem Plasma-Beta stationäre Tokamakentladungen zu erreichen, bei denen der Plasmastrom nicht durch den Transformator, sondern durch den internen Bootstrap-Strom aufrecht erhalten wird. Dies hebt die Beschränkung der Pulsdauer eines Tokamak auf und kann im Prinzip, wie im Stellarator, zu einem Kraftwerk mit Dauerbetrieb führen. Daher wird weltweit neben den Untersuchungen zum H-Regime auch die Möglichkeit von „Advanced Tokamak-Szenarien“ untersucht. Es zeigt sich jedoch, dass hierzu sowohl Isolationsgüte als auch Plasma-Beta noch über den im H-Regime erreichbaren Werten liegen müssen.

Ein nochmals verbesserter Energieeinschluss lässt sich durch den Aufbau sogenannter interner Transportbarrieren realisieren. Dies sind Bereiche im Plasmainternen, in denen die Wärmeisolation durch das Ausbilden einer Plasmaströmung stark verbessert ist. An ASDEX Upgrade konnte 1998 zum ersten Mal gezeigt werden, dass interne Transportbarrieren gleichzeitig in den Profilen der Ionen- und der Elektronentemperatur erreicht werden können (Abbildung unten). Ein Hauptproblem liegt aber im dauerhaften Aufrechterhalten solcher Entladungen, die wegen der hohen Druckunterschiede zwischen benachbarten magnetischen



Profile der Ionen- und Elektronentemperatur in ASDEX Upgrade über dem Plasmaradius. Im Bereich der internen Transportbarriere (blauer Bereich) werden die Profile deutlich steiler, so dass hohe Zentraltemperaturen erreicht werden.

Flächen zur Instabilität neigen. Daher ist die Verwirklichung stationärer Advanced Tokamak-Szenarien mit hohem Plasma-Beta auch in Zukunft ein wichtiger Forschungsschwerpunkt für ASDEX Upgrade. Erst dann wird sich herausstellen, ob diese Betriebsweise auch in ITER oder einem Kraftwerk anwendbar sein wird.

JET-Mitarbeit

Das Tokamak-Experiment JET (Joint European Torus) wird gemeinsam von allen Laboratorien des Europäischen Fusionsprogramms, darunter auch dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, in Culham/Großbritannien betrieben. Es ist das weltweit größte und am weitesten fortgeschrittene Fusionsexperiment: Der Plasmaring der Anlage hat einen Umfang von 20 Metern, eine Höhe von über drei Metern und einen

lassen. Dazu wurde JET von Anfang an technologisch auf den Betrieb mit Tritium und die dann notwendige Fernsteuerung der Anlage ausgerichtet.

Heute ist das JET-Plasma nur noch um einen Faktor sechs von der Zündbedingung entfernt und hat bis zu 16 Megawatt Fusionsleistung erzeugt. Der gewaltige Fortschritt der Fusionsforschung, der sich hinter diesen Daten verbirgt, wird deutlich im Vergleich zu den Werten des Jahres 1970, als die Überlegungen zum Bau des Experimentes begannen: Damals lagen die Resultate der weltbesten Experimente um einen Faktor 25.000 unter den Kraftwerkserfordernissen.

Generell experimentieren heutige Fusionsexperimente mit Modellplasmen aus normalem Wasserstoff oder Deuterium. Der Vergleich dieser zwei Möglichkeiten erlaubt eine Hochrechnung der Ergebnisse auf Deuterium-Tritium-Bedingungen, wie sie für ein künftiges Kraftwerk relevant sind. Zur Prüfung dieser Ergebnisse wurde in JET - der heute einzigen Anlage weltweit, die mit Tritium-Plasmen experimentieren kann - in zwei Experimentreihen mit Deuterium-Tritium-Plasmen gearbeitet (Abbildung Seite 52). In der ersten Experimentierphase im Jahr 1991 wurde die Menge des verfügbaren Tritiums auf 0,2 Gramm beschränkt, weil man - wegen geplanter Umbauten im Plasmagefäß - dessen radioaktive Belastung möglichst niedrig halten wollte. Das Plasma bestand daher nur zu elf Prozent aus Tritium. Dennoch wurden - erstmalig in der Geschichte der Fusionsforschung - 1,5 Megawatt Fusionsleistung erzeugt.

Im Jahre 1997 fand eine zweite Reihe von Deuterium-Tritium-Experimenten statt. Dabei veränderte man die Mischung von Deuterium und Tritium von 100 Prozent Deuterium über eine Zusammensetzung aus gleichen Teilen wie im späteren Kraftwerk bis hin zu 100 Prozent Tritium. So wurden

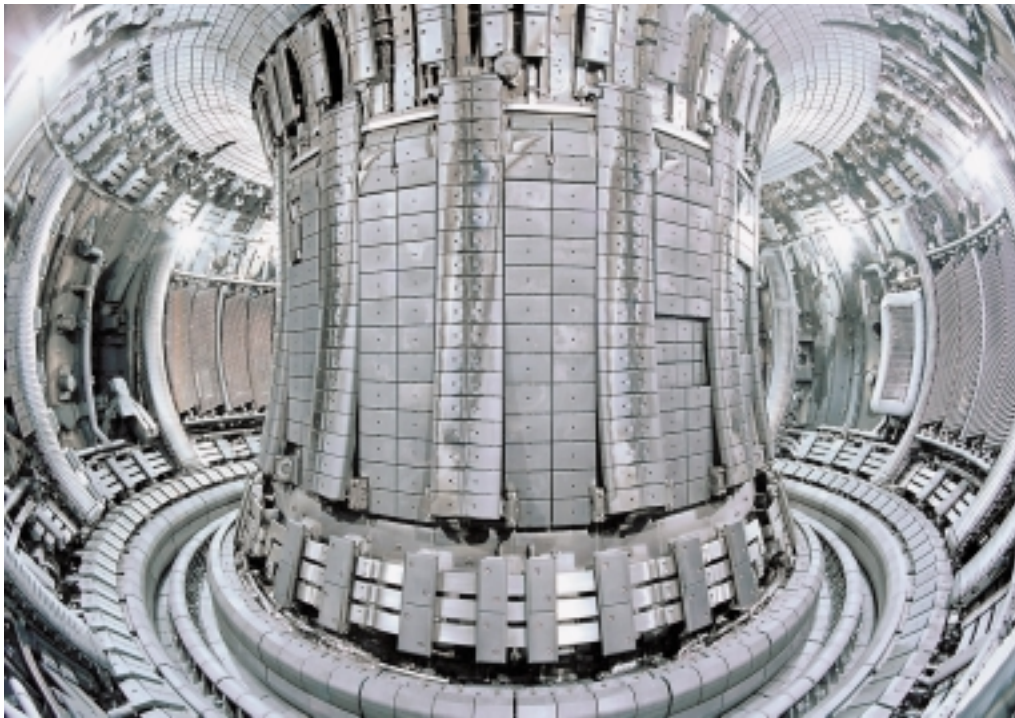
zuverlässige Vorhersagen der Plasmabedingungen mit reaktorrelevanten Brennstoffmischungen möglich.

Die höchste Fusionsleistung bis zu 16 Megawatt wurde unter transienten, d.h. vorübergehenden Bedingungen produziert. In der besten Entladung betrug das Verhältnis Q der erzeugten Fusionsleistung zur Heizleistung 0,64. Rund 65 Prozent der aufgewendeten Heizleistung wurde also durch Fusionsreaktionen zurückgewonnen. Unter statio-

Charakteristische Daten des Experimentes JET

Radius der Anlage (über alles):	7,5 Meter
Höhe (über alles):	11,5 Meter
Gewicht:	4000 Tonnen
Großer Plasmaradius:	2,93 Meter
Plasmahöhe:	4 Meter
Plasmabreite:	2,5 Meter
Plasmavolumen:	80 Kubikmeter
Plasmagewicht:	0,02 Gramm
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	32
Spulenstrom:	max. 78 Kiloampere
Magnetfeld:	max. 4,0 Tesla
Plasmastrom:	max. 5 Megaampere
Entladungsdauer:	max. 60 Sekunden
Heizleistung:	
- Neutralteilchenheizung	22 Megawatt
- Ionen-Zyklotronheizung:	15 Megawatt
- Lower-Hybrid-Stromtrieb	7 Megawatt

Durchmesser von 2,5 Metern. Das Experiment wurde ab 1972 von den Europäern gemeinsam konzipiert, innerhalb des vorgegebenen Kosten- und Zeitrahmens gebaut und seit 1983 auch gemeinsam betrieben. JET hat die Aufgabe, das Verhalten eines Fusionsplasmas nahe der Zündung zu untersuchen. Das Experiment soll Plasmazustände erreichen, die für ein Brennstoffgemisch aus Deuterium und Tritium einige Megawatt an Heizleistung aus den entstehenden Heliumkernen erwarten



**Blick in das
Plasmagefäß des
Joint European Torus
(JET).**

nären Bedingungen, wie sie für ein Kraftwerk notwendig sind, erreichte der Wert Q in JET ungefähr 0,2. Insgesamt lieferten diese Ergebnisse eine solide Grundlage zur Vorhersage der erreichbaren Fusionsleistung in einem zukünftigen Kraftwerk.

Im zweiten Deuterium-Tritium-Experiment wurde sehr viel mehr Tritium verwendet als im Jahr 1991. Um das Inventar dennoch zu begrenzen und ebenso die für das Fusionskraftwerk notwendige Technologie zu testen, wurde eine Tritium-Recycling-Anlage zur Wiederaufbereitung des nach jeder Entladung zurückgewonnenen Tritiums eingesetzt. Auf diese Weise wurde die gesamte Tritiummenge auf 20 Gramm begrenzt; durch Wiederverwendung des gesammelten Tritiums wurden jedoch Experimente mit fast 100 Gramm Tritium möglich.

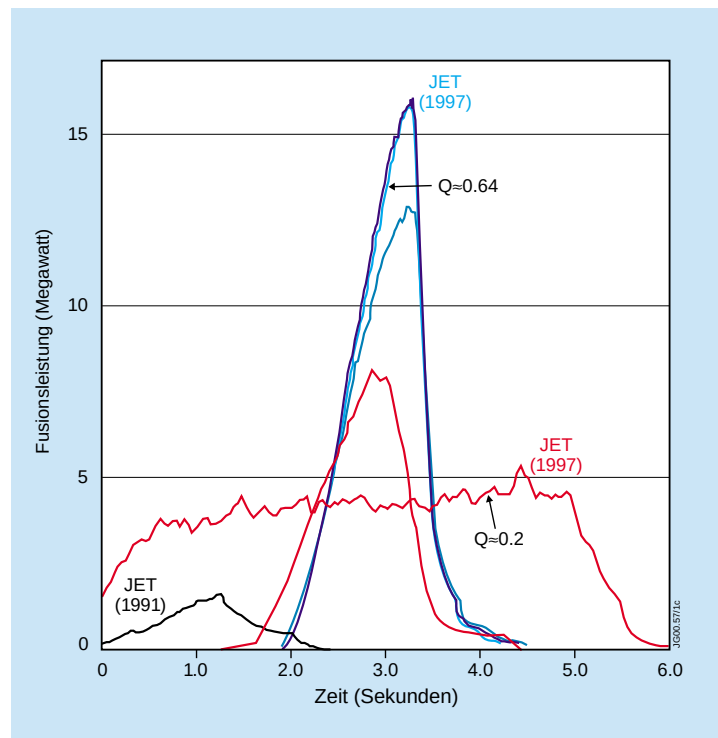
Die Aktivierung des Plasmagefäßes nach dem zweiten Deuterium-Tritium-Experiment macht langandauernde Wartungs- oder Umbauarbeiten durch im Gefäß arbeitende Techniker unmöglich. Stattdessen wird inzwischen für solche Arbeiten routinemäßig ein ferngesteuertes Robotersystem benutzt. Während einer fünfmonatigen Experimentierpause im Jahr 1998 wurde zum Beispiel die gesamte Divertorstruktur am Boden des Plasmagefäßes vollständig durch Roboter ersetzt. Der Erfolg dieser und späterer ferngesteuerter Instandhaltungsarbeiten zeigt die Brauchbarkeit dieser Technik auch in einem späteren Kraftwerk.

Seit dem Jahr 2000 wird JET in einer neuen Organisationsform im Rahmen des European

Fusion Development Agreement betrieben und ist kein selbständiges Gemeinschaftsprojekt der Europäischen Fusionslaboratorien mehr. Das Vorbereiten, Ausführen und Auswerten der Experimente übernehmen nun zeitweise von ihren Heimatlaboratorien abgeordnete Wissenschaftler und Techniker. Für den technischen Betrieb ist das britische Fusionslabor in Culham zuständig, das die Forschungsanlage samt der zugehörigen Messgeräte und Plasmaheizungen betriebsbereit zur Verfügung stellt. In der neuen Organisationsform soll das leistungsfähige JET-Experiment über das geplante Betriebsende im Jahr 1999 hinaus zur Vorbereitung des Internationalen Experimentalreaktors ITER genutzt werden.

Die Experimentierprogramme verfolgen zwei Ziele: Erstens die Demonstration eines konventionellen Plasmazustandes, wie er für ITER notwendig ist: Dazu muss der stabile Einschluss von Deuterium-Tritium-Plasmen mit hoher Plasmadichte und niedrigem Leistungsfluss auf die erste Wand kombiniert werden. Auf Kraftwerksgröße hochgerechnet, soll dies direkt zu einer wirtschaftlichen Energiequelle führen. Zweites Ziel des JET-Programms ist die Entwicklung eines „Advanced Szenario“ mit deutlich besserem Plasmaeinschluss als in herkömmlichen Experimenten: Kontrolliert man das Profil des Plasmastroms mit Hilfe externer Stromtriebssysteme, zum Beispiel durch Hochfrequenzheizung, so sollte man den Turbulenzmechanismus stabilisieren können, der den Energietransport aus dem Zentrum des

Zeitlicher Verlauf der in JET erzeugten Fusionsleistung in verschiedenen Plasmen: Die schwarze Linie zeigt eine der Deuterium-Tritium-Entladungen 1991 mit geringem Tritium-Anteil. Die übrigen Kurven zeigen Entladungen aus dem Jahr 1997. Das Verhältnis Q der erzeugten Fusionsleistung zur Heizleistung ist für die besten transienten (blau) und stationären Entladungen (rot) angegeben.



Plasmas zur Wand beherrscht. Anfängliche Ergebnisse sind ermutigend, obgleich noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten ist, bis diese Plasmen unter stationären Bedingungen existieren und Werte erreichen, die mit den technischen Randbedingungen in einem Kraftwerk verträglich sind.

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik ist ein Hauptteilnehmer des wissenschaftlichen JET-Programms. In den Jahren 2000 und 2001 haben sich über 35 IPP-Physiker an Experimenten bei JET beteiligt, die alle wichtigen plasmaphysikalischen Gebiete abdecken. Dabei beginnt die Teilnahme mit einem Experimentiervorschlag der interessierten Parteien und schließt Besuche bei JET und die dortige Ausführung der Experimente ein. Die Ergebnisse werden dann im allgemeinen in den Heimatlaboratorien im Detail analysiert. Da das JET-Programm vor allem der Vorbereitung von ITER dienen soll, ist der Vergleich zwischen JET und dem Garching ASDEX Upgrade - den beiden größten ITER-ähnlichen Tokamaks in Europa - besonders fruchtbar. IPP-Physiker und -Ingenieure sind darüber hinaus auch an der Definition und Realisation des Ausbaus der JET-Maschine beteiligt, wiederum hauptsächlich mit dem Ziel, das Verhalten von ITER besser voraussagen zu können.

ITER-Mitarbeit

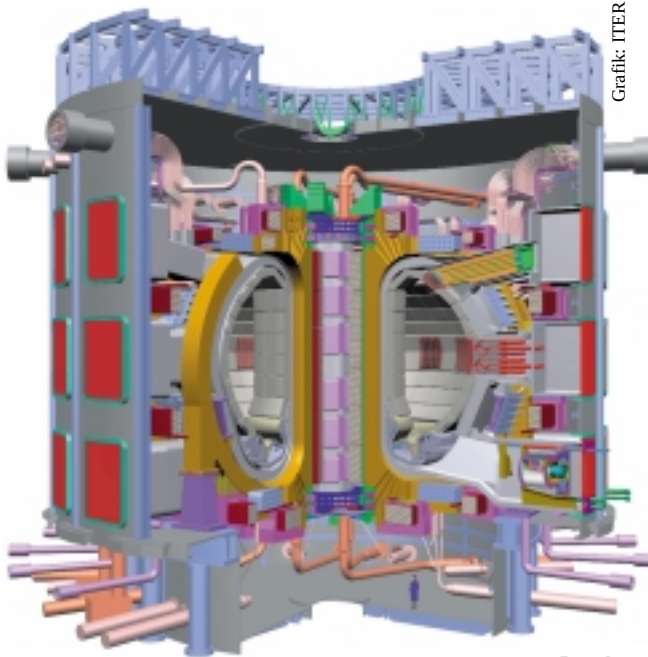
Das Experiment JET kann wichtige physikalische Erfordernisse für ein Fusionskraftwerk prüfen. Vor dem Bau eines Demonstrationskraftwerks muss jedoch der Nachweis erbracht werden, dass ein für längere Zeit brennendes Plasma physikalisch und technisch realisierbar ist. Außerdem müssen eine große Zahl technischer Kraftwerkskomponenten weiterentwickelt und erprobt werden. Hierzu gehören supraleitende Magnetspulen, die Tritium-Technologie, das Abführen der erzeugten Wärme-Energie, die Entwicklung fernbedient auswechselbarer Komponenten sowie die Erforschung der Sicherheits- und Umweltfragen der Fusion. Dazu beteiligt sich Europa seit 1988 an der weltweiten ITER-Zusammenarbeit. Die Dimensionen dieses Experimentalreaktors werden die von JET noch einmal deutlich übersteigen, vor allem wegen der zusätzlich nötigen technischen Komponenten wie Blanket und radiologischer Abschirmung. Das ITER-Projekt wurde 1985 in Gesprächen des damaligen sowjetischen Generalsekretärs Gorbatschow mit den Präsidenten Frankreichs und der USA, Mitterrand und Reagan, eingeleitet. Im Frühjahr 1988 begannen dann am IPP als Gastlabor die Planungsarbeiten. Im Dezember 1990 legte die amerikanisch-europäisch-japanisch-russische ITER-Studien-

gruppe einen ersten Entwurf des Testreaktors vor.

Während der 1992 angelaufenen, sechsjährigen detaillierten Planungsphase arbeitete ein gemeinsames, international besetztes Team von rund 210 ITER-Mitarbeitern an drei Fusionszentren: in San Diego/USA, an dem japanischen Fusionslabor in Naka sowie wiederum am IPP in Garching. Dabei war jedes dieser Zentren für besondere Planungsarbeiten verantwortlich: Garching für physikalische Fragen und die Komponenten im Plasmagefäß - Abschirmung und Blanket, erste Wand und Divertor - Naka für die Komponenten außerhalb des Plasmagefäßes, d.h. supraleitende Magnete und Abstützung, sowie San Diego für Sicherheitsuntersuchungen und Koordination. Sitz des Aufsichtsgremiums - des ITER-Rates - war Moskau. Unterstützt wird das zentrale ITER-Team durch Gruppen in den jeweiligen Heimatlaboratorien der Partner, die auch die nötigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für ITER übernehmen. Das EFDA-Team (European Fusion Development Agreement) in Garching fungiert dabei seit 1998 als das europäische ITER-Team. Vorher war dies die Aufgabe des ebenfalls in Garching angesiedelten NET-Teams (Next European Torus).

Der fertige Entwurf für einen Testreaktor, der das selbständige Brennen eines Fusionsplasmas demonstrieren sollte, wurde am Ende dieser Planungsphase 1998 vorgelegt. Obwohl mit diesem Entwurf aus wissenschaftlich-technischer Sicht aller Beteiligten eine solide Grundlage für den Bau der Anlage vorlag und die Kosten von 13 Milliarden Mark im zuvor genehmigten Finanzrahmen blieben, konnte man dennoch - angesichts der Finanzschwierigkeiten in den Partnerländern - nicht zu einer Bauentscheidung kommen. Dies führte zu einem Rückzug der USA aus den ITER-Aktivitäten.

Die verbleibenden Partner Japan, Europa und Russland beschlossen, den ITER-Entwurf in einer dreijährigen Planungsverlängerung kostensparend zu überarbeiten. Dabei sollte das Ziel beibehalten werden, die Fusion innerhalb nur einer



Grafik: ITER

Der Internationale Experimentalreaktor ITER im Entwurf. Von innen nach außen: Transformatorspule (rosa), Blanket (grau), Plasmagefäß mit den am Boden angebrachten Divertorplatten (grau), Magnete (gelb) und Kryostat.

weiteren Experimentgeneration bis zum Demonstrationskraftwerk zu bringen. Letzteres erfordert, dass auch in einem verkleinerten ITER die thermonukleare Selbstheizung des Plasmas jede Fremdheizung um einen Faktor zwei übertrifft, dass ein echt stationärer Betrieb bei dominierender Fusionsheizung möglich ist und wesentliche Technologien eines Fusionskraftwerks wie supraleitende Spulen, Fernbedienungstechnik für Service-, Reparatur- und Umbauarbeiten sowie Brutmodule zum Erzeugen des Brennstoffbestandteils Tritium zum Einsatz kommen. Der Prozess des Abwägens zwischen angestrebter Kostensenkung einerseits und erreichbaren Betriebsbedingungen und technischen Zielen andererseits wurde mit dem

Gesamtradius (über alles):	15 Meter
Höhe (über alles):	30 Meter
Gewicht:	15000 Tonnen
Plasmaradius:	6,2 Meter
Plasmahöhe:	7,4 Meter
Plasmabreite:	4,0 Meter
Plasmavolumen:	837 Kubikmeter
Magnetfeld:	5,3 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	15 Megaampere
Heizleistung und Stromtrieb:	73 Megawatt
Wandbelastung durch Neutronen:	0,57 Megawatt pro m ²
Fusionsleistung:	500 Megawatt
Brenndauer:	≥ 300 Sekunden

Charakteristische Daten des ITER-Experiments (nach dem Abschlussbericht vom Juli 2001)

**Prototyp der Hälfte
eines Plasmagefäß-
Sektors in
Originalgröße - nach
dem ITER-Entwurf von
1998 - hergestellt
in Japan**



Foto: ITER

Mitte des Jahres 2001 vorgelegten Entwurf für ITER-FEAT (Fusion Energy Amplifying Tokamak) abgeschlossen: Mit einer Verkleinerung des Plasmavolumens von ursprünglich 2000 auf 840 Kubikmeter ließen sich die Baukosten auf rund 4 Milliarden Euro ungefähr halbieren. Die größten Einsparungen ergaben sich dabei durch die Größenreduzierung bei den Gebäuden und den supraleitenden Magnetspulen. Der von den Spulen erzeugte Magnetfeldkäfig schließt einen Plasmaring ein, dessen Radius von zuvor acht auf jetzt sechs Meter gekürzt wurde. Daraus folgt eine reduzierte Fusionsleistung von 500 Megawatt (zuvor 1500) und ein Energiegewinnungsfaktor von etwa 10: Das zehnfache der zur Plasmaheizung aufgewandten Energie wird als Fusionsenergie gewonnen.

Neben der Verkleinerung der Anlage konnte man zur Kostensenkung ebenso neue technologische Erkenntnisse nutzen. Zur Unterstützung der ITER-Planung wurden nämlich 1995 sieben große Technologieprojekte begonnen: Um die industrielle Machbarkeit und Tauglichkeit der wesentlichen ITER-Bauteile zu zeigen, wurden zwei Magnetspulen-Modelle (siehe Seite 23), ein Prototyp-Teil des Plasmagefäßes (Abbildung oben), Blanket-Bausteine, Divertor-Komponenten sowie Fernbedenungs-Apparaturen

zum Auswechseln von Blanket- und Divertor-Teilen gefertigt. Alle Prototypen und Modelle wurden inzwischen unter den späteren Betriebsbedingungen getestet. Auch die in diesem Technologieprogramm gewonnenen fertigungstechnischen Erfahrungen sind kostensparend in den Neuentwurf eingeflossen.

Zur Zeit wird die Frage des möglichen ITER-Standortes diskutiert. Seit dem Jahr 2000 liegt ein offizielles Angebot der kanadischen Regierung vor, Gastgeber für ITER zu sein. Auch in Japan und Europa gibt es konkrete Entwicklungen auf einen Standortvorschlag hin, so dass die baldige Bekanntgabe weiterer Angebote erwartet werden kann. Angesichts dieser positiven Entwicklungen erscheint auch eine Wiederaufnahme der ITER-Aktivitäten in den USA nicht ausgeschlossen. Ungefähr zehn Jahre nach der Baugenehmigung könnte ITER das erste Plasma erzeugen, so dass mit einem Betriebsbeginn im nächsten Jahrzehnt gerechnet werden kann.

Abgesehen von seiner Rolle als Gastgeber der EFDA- und ITER-Gruppe trägt das IPP mit dem Forschungsprogramm seines Experiments ASDEX Upgrade mit einem Großteil seiner Aktivitäten zur Vorbereitung des Testreaktors bei. Hier sind vor allem die Untersuchungen zur Divertorphysik, zur magnetohydrodynamischen Stabilität sowie der Konzeptverbesserung hin zum „Advanced Tokamak“ zu nennen. Außerdem stehen die IPP-Wissenschaftler in allen physikorientierten Fragen in engem Kontakt mit der ITER-Gruppe und haben darüber hinaus in zahlreichen Vertragsstudien spezielle Probleme für ITER bearbeitet. Schließlich übernimmt das IPP zunehmend Arbeiten, die auf den Entwurf und Bau spezieller Komponenten von ITER hinzielen. Hier sollen Beiträge zur Diagnostikentwicklung, zu Heiz- und Stromtriebmethoden sowie zur Experimentsteuerung und -regelung erbracht werden.

Stellaratoren

Fusionsexperimente vom Typ Stellarator haben sich in den letzten Jahren als aussichtsreiche Alternative zu Tokamaks entwickelt. Stellaratoren schließen das Plasma durch Magnetfelder ein, die allein durch Spulen außerhalb des Plasmabereichs erzeugt werden. Ein Strom im Plasma - wie im Tokamak - ist also nicht nötig. Wichtigste Folgen hieraus sind: Stellaratoren eignen sich für den Dauerbetrieb, die unerwünschten Abbrüche des Plasmastromes treten nicht auf. Als weltweit einziges Institut betreibt das IPP mit den Tokamaks der ASDEX- und den Stellaratoren der WENDELSTEIN-Serie beide Linien parallel zueinander und hat damit die Möglichkeit des direkten Vergleichs.

Einer der Gründe für den historischen Vorsprung der Tokamaks waren die mäßigen Kraftwerkseigenschaften des früheren „klassischen“ Stellarators. Mit seinem unzureichend einschließenden Magnetfeldkäfig, der überdies von ineinander verketteten, d.h. schwer demontierbaren Spulensystemen erzeugt wurde, hatte er als Fusionskraftwerk wenig Aussichten. Zur verbesserten Umsetzung des Stellaratorprinzips beschritt die Stellaratorforschung im IPP daher gänzlich neue Wege: In strikter Ausrichtung auf die Kraftwerkserfordernisse löste man sich erstens von dem alten Spulenkonzept der

helikalen Windungen und begann zweitens mit der systematischen Suche nach dem optimalen Magnetfeld eines Stellarators. Der dafür notwendige große Theorie- und Rechenaufwand konnte erst durch die modernen schnellen Computer bewältigt werden. In mehr als zehnjähriger Arbeit beschrieb und untersuchte die Gruppe „Stellarator-Theorie“ des IPP den weiten Raum theoretisch möglicher Stellarator-Konfigurationen. Die Anforderungen an die Kraftwerkseigenschaften wurden schrittweise eingebaut und so die bezüglich Plasmagleichgewicht, Stabilität und Einschlussvermögen optimale Konfiguration entwickelt - der „Advanced Stellarator“. In dieser optimierten Form können Stellaratoren als echte Alternative zu einem Tokamakkraftwerk gelten.

Das Experiment WENDELSTEIN 7-AS, die erste Anlage dieser neuen Stellarator-Generation, ging 1988 in Betrieb und unterwirft die theoretischen Überlegungen einem ersten praktischen Test. Gleichzeitig ist ein modulares Spulenkonzept verwirklicht, das auch technologisch kraftwerksrelevant ist. Der weiterentwickelte Nachfolger WENDELSTEIN 7-X, der gegenwärtig im IPP-Teilinstitut Greifswald entsteht, soll die Kraftwerkstauglichkeit der neuen Stellaratoren demonstrieren.

Foto: Peter Ginter



Das Stellarator-Experiment WENDELSTEIN 7-AS.

Fusionsexperiment WENDELSTEIN 7-AS

Der Stellarator WENDELSTEIN 7-AS ist seit 1988 in Betrieb. Als erste Anlage der neuen Generation der „Advanced Stellarators“ unterwirft er die zugrundeliegenden Optimierungsprinzipien einem ersten praktischen Test: Von bisherigen Stellaratoren unterscheidet sich WENDELSTEIN 7-AS durch ein besser geformtes Magnetfeld, das eine höhere Dichtigkeit des magnetischen Käfigs besitzt und ein Plasmagleichgewicht bei höherem Druck ermöglicht. Auch technisch geht WENDELSTEIN 7-AS durch seine neuartigen Magnetspulen über bisherige Stellaratoren hinaus: Ein einziger Satz aus 45 nichtebenen Einzelspulen erzeugt das gesamte zum Plasmaeinschluss nötige Feld. Es konnte gezeigt werden, dass das berechnete Magnetfeld sich von diesen modularen Spulen mit der erforderlichen Genauigkeit erzeugen lässt.

Ziel der Untersuchungen an WENDELSTEIN 7-AS ist es, die physikalischen und technischen Grundlagen des Advanced Stellarator zu testen. Untersucht werden insbesondere die Einschlusseigenschaften des verbesserten Magnetfeldes, d.h. der Energie- und Teilchentransport, auch unter dem Einfluss von elektrischen Feldern und Plasmaströmen, sowie das Plasmagleichgewicht und seine Stabilität in Abhängigkeit vom Plasmadruck. Seit kurzem liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der Untersuchung des Verunreinigungstransports und der Verunreinigungskontrolle. Neu entwickelt oder für die Anwendung an WENDELSTEIN 7-AS opti-

miert wurden verschiedene Heizverfahren.

Bisher liefen 53.000 Entladungen mit typischen Pulsdauern von 0,5 bis 1,5 Sekunden. In diesen Entladungen konnte WENDELSTEIN 7-AS die bekannten Vorzüge des stromlosen Stellarators gegenüber dem Tokamak bestätigen: Der nettostromfreie Betrieb wurde demonstriert, d.h. Stellaratoren eignen sich für den Dauerbetrieb; Stromabbrüche treten nicht auf. Die bisherigen Experimente zeigen außerdem die Leistungsfähigkeit der Optimierungskriterien. Damit wurden die Voraussetzungen geschaffen, mit der zur Zeit im Teilinstitut Greifswald entstehenden größeren und vollständig optimierten Anlage WENDELSTEIN 7-X die Kraftwerkstauglichkeit der Stellaratoren zu untersuchen.

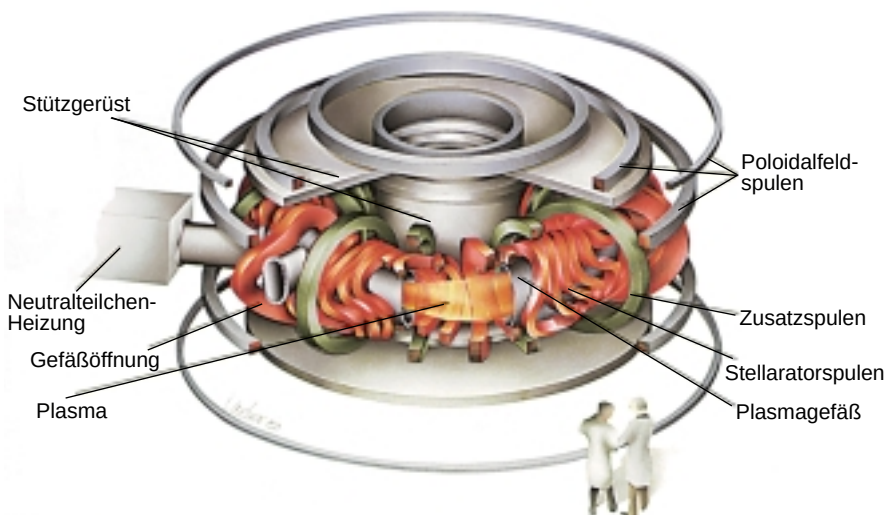
Kernstück von WENDELSTEIN 7-AS ist der Kranz aus 45 Stellaratorspulen, der das gesamte zum Plasmaeinschluss nötige Feld produziert (siehe Abbildung). Überlagerte toroidale und vertikale Felder, die von zusätzlichen Spulen erzeugt werden, können dieses System verändern. So lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Magnetfeldkonfigurationen, die sich hinsichtlich Rotationstransformation, Verscherung der magnetischen Feldlinien oder magnetischer Spiegel unterscheiden, auf das Plasmaverhalten untersuchen.

An WENDELSTEIN 7-AS werden drei unterschiedliche Heizverfahren zur Erzeugung und Heizung „stromloser“ Plasmen benutzt: Heizung durch Wellen der Elektronen- und Ionen-Zyklotronfrequenz sowie Neutralteilchenheizung. Bei den Hochfrequenz-Heizverfahren koppelt die Ionenzyklotronheizung an die Kreisbewegung der Ionen um die Magnetfeldlinien an, die Elektronen-Zyklotronheizung an die der Elektronen.

Der Hochfrequenzheizung bei der Elektronen-Zyklotronfrequenz kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Die Mikrowellen können das Plasma nicht nur wirksam heizen, sondern auch aus einem Neutralgas erzeugen. An WENDELSTEIN 7-AS stehen in der letzten Ausbaustufe vier Mikrowellen-Generatoren, sogenannte Gyrotrons, mit einer Frequenz von 140 Gigahertz sowie ein weiteres bei 70 Gigahertz zur Verfügung. Das bedeutet eine Gesamtheizleistung von etwa zwei Megawatt bei 140 Gigahertz und 0,5 Megawatt bei 70 Gigahertz mit jeweils einer Pulsdauer von etwa einer Sekunde. Die Mikrowellen können bei den Resonanzfeldstärken von 1,25 bzw.

Grafik: Johann Weber

Spulenordnung von WENDELSTEIN 7-AS: Das Experiment besitzt ein Hauptspulensystem aus 45 nicht-ebenen Einzelspulen (rot). Ihr Magnetfeld kann mit Hilfe ebener Zusatzspulen (grün) zur Veränderung der Rotationstransformation variiert werden. Ein Vertikalfeld (graue Poloidalfeldspulen) dient zur Verschiebung der Plasmasäule im Gefäß.



2,5 Tesla Plasmen bis zu einer Dichtegrenze von $3 \cdot 10^{13}$ bzw. $6 \cdot 10^{13}$ (bei 70 Gigahertz) oder $1,2 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro Kubikzentimeter (bei 140 Gigahertz und 2,5 Tesla) aufbauen. Bei höheren Plasmadichten werden die Mikrowellen normalerweise vom Plasma reflektiert.

Wegen der kurzen Wellenlänge im Millimeterbereich können die Mikrowellen direkt über Fenster und Spiegel „quasioptisch“ in das Plasma eingestrahlt werden, ähnlich wie bei einer Richtfunkstrecke. Eine Antenne in Plasmanähe, die zu einem Zufluss von Verunreinigungen führen könnte, ist also nicht nötig. Ein großer Vorteil der Elektronen-Zyklotronheizung ist auch, dass sie das Plasma lokal aufheizen kann. So lässt sich die Temperaturverteilung der Elektronen lokal verändern und damit der Wärmetransport der Elektronen gezielt untersuchen. Die Experimente zur Elektronen-Zyklotronheizung an WENDELSTEIN 7-AS werden zusammen mit dem Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart ausgeführt, wo die Leitungen zur Übertragung der Mikrowellen entwickelt wurden.

Für WENDELSTEIN 7-AS ist die Heizung mit Elektronen-Zyklotronwellen nicht nur ein Zünd- und Heizverfahren, sondern auch ein eigenständiges Forschungsprogramm. Es konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass man durch geeignete Einstrahlung der Wellen einen toroidalen Strom wie im Tokamak treiben kann. Bei diesem sogenannten Elektronen-Zyklotron-Stromtrieb wird über eine asymmetrischen Verformung der Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen eine Netto-Drift der Elektronen erzeugt.

In einem weiteren wichtigen Entwicklungsschritt konnte die Dichtebeschränkung für die Elektronen-Zyklotronheizung überwunden werden: Ab einer kritischen Elektronendichte ist das Plasma für elektromagnetische Zyklotronwellen nämlich reflektierend und damit unzugänglich - ähnlich wie Licht, also Strahlung im sichtbaren Frequenzbereich, an metallischen Oberflächen reflektiert wird. An WENDELSTEIN 7-AS ist es nun gelungen, unter bestimmten Voraussetzungen die elektromagnetischen Zyklotronwellen im Plasma in

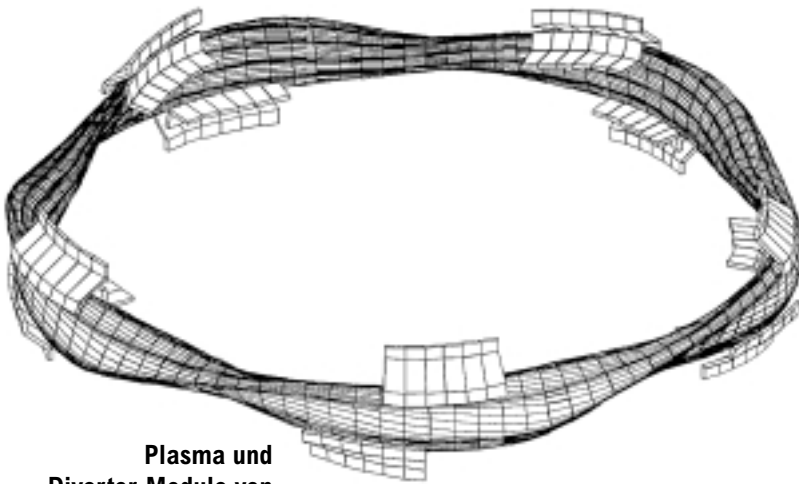
elektrostatische Wellen, ähnlich den Schallwellen, umzuwandeln. So konnte der Einsatzbereich der Elektronen-Zyklotronheizung zu extrem hohen Plasmadichten ausgeweitet werden. Da bei diesen hohen Dichten an WENDELSTEIN 7-AS Plasmazustände mit besonders attraktiven Eigenschaften gefunden wurden, ist diese neu gefundene Technik besonders bedeutsam.

Radius der Anlage (über alles):	3,6 Meter
Höhe (über alles):	4 Meter
Gewicht:	250 Tonnen
Großer Plasmaradius:	2 Meter
Mittlerer kleiner Plasmaradius:	0,18 Meter
Plasmavolumen:	ca. 1 Kubikmeter
Plasmagewicht:	$\leq 0,001$ Gramm
Anzahl der modularen Spulen:	45
Strom pro Spulenwindung:	35 Kiloampere
Magnetfeld:	bis 2,5 Tesla
Rotationstransformation:	0,3 - 0,6
Pulsdauer:	bis 3 Sekunden
Heizleistung:	
- Elektronen-Zyklotronheizung:	2,1 Megawatt
- Ionen-Zyklotronheizung:	0,5 Megawatt
- Neutralinjektion:	2,6 Megawatt

Charakteristische Daten des Experimentes WENDELSTEIN 7-AS.

Die Neutralteilchenheizung an WENDELSTEIN 7-AS ist mit zwei Injektoren mit jeweils vier Ionenquellen ausgerüstet. Sie erzeugen zusammen Heizleistungen bis zu 2,6 Megawatt. Diese Leistung kann nur in ein „Startplasma“ eingekoppelt werden, das im allgemeinen durch Elektronen-Zyklotronheizung erzeugt worden ist. Da die Neutralteilchenheizung das Plasma nicht nur heizt, sondern mit dem Einschießen der Neutralteilchen auch die Dichte des Plasmas erhöht, lässt sich die Plasmadichte vor allem bei hoher Heizleistung nur noch schwer kontrollieren. Dichtekontrolle konnte jedoch mit der gleichzeitigen Verwendung der Elektronen-Zyklotronheizung erreicht werden, wenn die Leistung der Neutralteilchenheizung die der Elektronen-Zyklotronheizung nicht wesentlich übersteigt. Dabei muss aber gegebenenfalls auch die Dichtegrenze der Elektronen-Zyklotronheizung beachtet werden. Erst durch den Einbau von Divertor-Modulen konnte dieses Problem gelöst werden, da nun die von der Wand des Plasmagefäßes zurückkommenden Teilchen besser kontrolliert werden können.

Die Hochfrequenzheizung bei der Ionen-Zyklotronfrequenz von 38 Megahertz - die

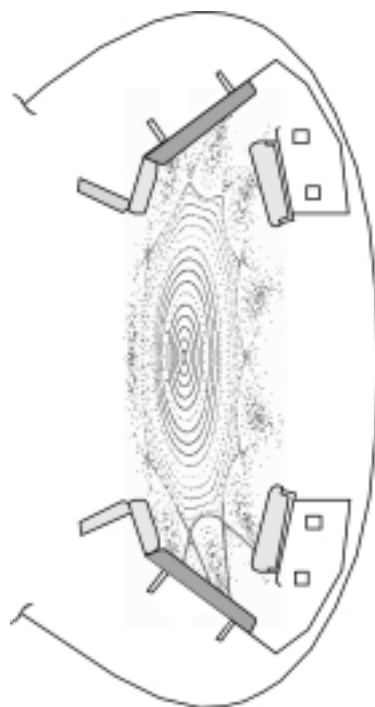


**Plasma und
Divertor-Module von
WENDELSTEIN 7-AS**

dritte Heizmethode an WENDELSTEIN 7-AS - hat den Vorteil, dass sie direkt die Plasmaionen heizt, deren Temperatur in einem Fusionsplasma besonders hoch sein muss. Allerdings ist eine Ankopplung an das Plasma unter den in WENDELSTEIN 7-AS gegebenen Bedingungen besonders schwierig. Die Wellenlänge ist nämlich wesentlich größer als die Abmessungen des Plasmagefäßes. Erst nach mehreren Versuchen konnten die damit verbundenen technischen Probleme gelöst und eine geeignete Antennenform gefunden werden. Bei einer Leistung von etwa 500 Kilowatt konnte damit das Plasma mit einem Wirkungsgrad geheizt werden, der mit dem anderer Heizmethoden vergleichbar ist.

Mit Hilfe einer einfachen Schleifenantenne ist bei einer Frequenz von 900 Megahertz der Plasmaaufbau mit anschließender Heizung durch Neutralinjektion gelungen. Damit steht

**Plasmaquerschnitt von
WENDELSTEIN 7-AS
am Ort zweier
Divertor-Module. Der
Plasmarand fächert
sich entsprechend der
„Inselstruktur“ des
Feldes in einzelne
Ausläufer auf.**



ein weiteres Verfahren zur Erzeugung eines Startplasmas zur Verfügung, mit dem Vorteil, nicht wie die Elektronen-Zyklotronheizung auf bestimmte Werte des Magnetfeldes festgelegt zu sein.

Wichtig für die Qualität einer Plasmaentladung ist eine geeignete Kontrolle der Plasma-Wand-Wechselwirkung, d.h. des Plasmarandbereichs mit dem Übergang vom heißen Plasma auf die kalten Wände. Dabei muss so weit wie möglich verhindert werden, dass Wandmaterialien mit hoher Kernladungszahl wie zum Beispiel Eisen und andere Edelstahlbestandteile in das Plasma eindringen. Bei hoher Plasmatemperatur und -dichte strahlen sie sonst einen beträchtlichen Teil der Heizleistung ab, der dann nicht mehr zur Heizung des Plasmas zur Verfügung steht. Plasmanähe Einbauten werden deshalb mit Graphitziegeln bedeckt, da Kohlenstoffatome schon bei relativ niedrigen Plasmatemperaturen alle Elektronen verlieren und damit kaum noch strahlen können. Auch die Limiter, mit denen bis vor kurzem das Plasma in WENDELSTEIN 7-AS an wenigen Stellen begrenzt wurde, waren deshalb mit Graphitziegeln belegt. Durch Bedecken der Wände mit dünnen Schichten aus Bor konnten die aus der Wand stammenden Verunreinigungen weiter verringert werden. Vor allem die Konzentration von Sauerstoff, der aus der Luft stammt und von Bor chemisch fest gebunden wird, kann damit wesentlich reduziert werden.

Unter diesen Bedingungen konnten in WENDELSTEIN 7-AS Ergebnisse erzielt werden, die in Stellaratoren vergleichbarer Größe immer noch weltweit die besten sind. Wichtig ist dabei nicht nur das Erreichen von Maximalparametern. Ebenso wichtig ist die Untersuchung von Energie- und Teilchentransport des Plasmas sowie seiner Stabilität, da sie Größen wie Plasmatemperatur, -dichte und -druck auf Werte begrenzen können, die häufig noch weit unter den in einem Fusionsplasma notwendigen Werten liegen.

Mit Hochfrequenzheizung bei 70 und 140 Gigahertz und Leistungen bis zu 2,1 Megawatt wurden bei vollem Magnetfeld von 2,5 Tesla Elektronentemperaturen bis zu 70 Millionen Grad und Ionentemperaturen um sieben Millionen Grad erreicht bei Plasmadichten bis zu $2 \cdot 10^{13}$ Teilchen pro Kubikzentimeter. Die Ionen werden dabei nur über Stöße durch die heißeren Elektronen geheizt.

Neutralteilchenheizung heizt sowohl die Elektronen als auch die Ionen. Bei niedriger Heizleistung kann damit die Energieein-

schlusszeit mehr als 60 Millisekunden betragen bei Plasmatemperaturen von etwa 10 Millionen Grad und Plasmadichten bis zu $1 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro Kubikzentimeter. Je besser die Einschlusszeit ist, desto höher werden die Plasmatemperaturen bei vorgegebener Heizleistung.

Experimente mit kombinierter Heizung durch Neutralteilcheninjektion und Elektronen-Zyklotronwellen erlaubten eine Kontrolle der Dichte im Bereich von ca. $5 \cdot 10^{13}$ Teilchen pro Kubikzentimeter bei rund einem Megawatt Neutralteilchen- und 400 Kilowatt Elektronen-Zyklotronheizung. Unter diesen Bedingungen wurden die höchsten Iontemperaturen von ca. 15 Millionen Grad erreicht bei noch etwas höheren Elektronentemperaturen.

Durch Heizung mit Neutralteilcheninjektion allein ergaben sich bei Plasmadichten von $3 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro Kubikzentimeter - also Reaktordichte - Elektronen- und Iontemperaturen von rund vier Millionen Grad. Die hohen Dichtewerte sind allein über die Energiebilanz begrenzt, d.h. über die angebotene Leistung im Verhältnis zu Strahlungs- und Wärmetransportverlusten. Sie übersteigen deutlich die Werte, die in vergleichbaren Tokamaks erzielbar sind, wo Strominstabilitäten einschränkend wirken. Bei maximaler Heizleistung wurden auch die höchsten Plasmadrücke erzielt und damit die besten Werte für Beta, das Verhältnis von Plasmadruck zu magnetischem Druck. Wesentliches Ziel dieser Experimente war es, die erreichbaren Beta-Werte zu testen und mit den Vorhersagen der Theorie zu vergleichen. Erzielt wurden bei einer Injektionsleistung von zwei Megawatt und einem Magnetfeld von 1,25 Tesla mittlere Beta-Werte bis zu zwei Prozent. Dieser Wert führt nahe an die für WENDELSTEIN 7-AS vorhergesagte Stabilitätsgrenze von ebenfalls etwa zwei Prozent heran. Trotzdem waren keine Anzeichen für eine durch Instabilitäten verursachte Einschlussverschlechterung erkennbar.

1992 ist es in WENDELSTEIN 7-AS weltweit erstmalig gelungen, das bei den Tokamaks so erfolgreiche H-Regime mit seinen verbesserten Einschlusseigenschaften auch in einem Stellarator zu beobachten. Allerdings ist die Verbesserung der Energieeinschlusszeit um rund 30 Prozent nicht so ausgeprägt wie in Tokamaks. Zudem ist das H-Regime in WENDELSTEIN 7-AS bislang nur in einem engen Arbeitsbereich von Dichte und Rotationstransformation zu erreichen. Berücksichtigt man jedoch, dass WENDEL-

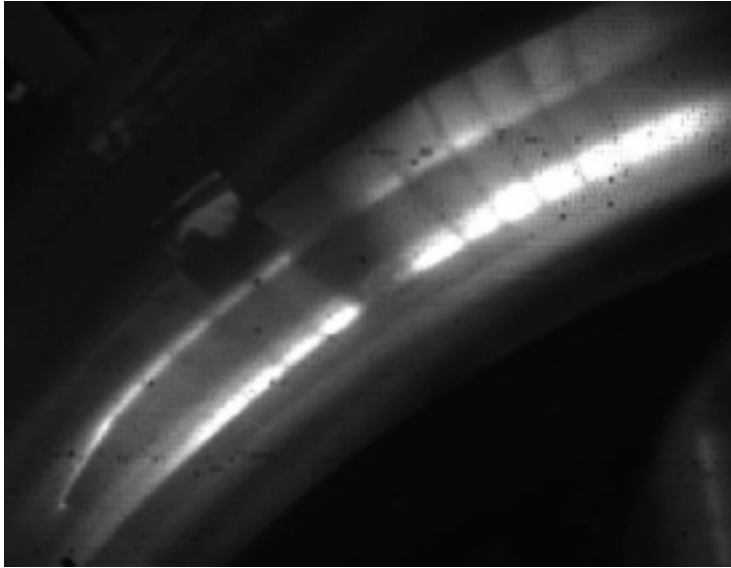
STEIN 7-AS wesentlich kleiner ist als die heutigen Tokamaks und die Ergebnisse in einem limiterbegrenzten Plasma erzielt wurden, so ergeben sich für einen größeren und mit Divertor ausgerüsteten Stellarator wie WENDELSTEIN 7-X günstige Perspektiven.

Vorstudien zu einem Stellarator-Divertor wurden bei WENDELSTEIN 7-AS ab 1994 begonnen. Ausgangspunkt war die Erkenntnis, dass vor allem bei hoher Heizleistung und langen Entladungen die Dichte- und Verunreinigungskontrolle nur beschränkt möglich



war - zum Beispiel wegen einer lokalen Überhitzung der das Plasma begrenzenden Limiter-Graphitziegel. Durch Einstellen einer geeigneten Form des Magnetfeldes kann man das Plasma aber weniger von den Limitern, sondern mehr durch eine magnetische Separatrix begrenzen. In diesem Separatrix-Betrieb laufen Energie- und Teilchen aus dem Plasma auf eng begrenzte Stellen an der Gefäßwand, entsprechend der am Plasmarand durch sogenannte „magnetische Inseln“ veränderten Magnetfeldgeometrie. Diese magnetischen Inseln sind eine natürliche Eigenschaft der nicht-axialsymmetrischen Stellaratorfelder und müssen nicht - wie das Divertorfeld der Tokamaks - erst durch zusätzliche Magnetfelder erzeugt werden. Zur besseren Kontrolle der Plasma-Wand-Wech-

Einbau der Divertor-Module in das Vakuumgefäß von WENDELSTEIN 7-AS



Mit einer CCD-Kamera beobachtete Auftreffstellen des Plasmas auf den Divertorplatten.

selwirkung trägt der Separatrixbetrieb aber nur bei, wenn an den beaufschlagten Wandstellen geeignete - divertorähnliche Teilchenfallen eingebaut werden. Zu diesem Zweck wurden „Divertor-Module“ entwickelt und in den Jahren 1999 und 2000 an Stelle der Limiter eingebaut. Die Abbildung auf Seite 58 oben zeigt, wie diese Divertor-Module um das Plasma herum verteilt sind. Die Abbildung unten zeigt einen Querschnitt durch das Plasma am Ort zweier gegenüberliegender Divertor-Module. Der Plasmarand fächert sich entsprechend der „Inselstruktur“ des Feldes in einzelne Ausläufer auf, so dass Energie und Teilchen aus dem Plasma lokalisiert auf die Graphitplatten des Divertors gelenkt werden.

Die Experimente nach dem Einbau der Divertor-Module haben die Erwartungen vollständig erfüllt. Eine Aufnahme mit einer CCD-Kamera (Abbildung oben) zeigt zum Beispiel, dass das Plasma - wie vorhergesagt - entlang zweier Streifen auf den Divertorplatten auftritt, ganz ähnlich dem Divertorplasma in einem Tokamak. Dabei hat sich die Verunreinigungs- und Dichtekontrolle und damit die Kontrolle der Plasma-Wand-Wechselwirkung ganz erheblich verbessert. So wurden weitgehend stationäre Plasmaentladungen über viele Energie- und Teilcheneinschlusszeiten möglich und zwar auch bei sehr hoher Plasmadichte und maximaler Heizleistung. Zugleich sind die Energieverluste durch Verunreinigungsstrahlung im Plasmazentrum stark reduziert und treten fast nur noch - wie erwünscht - am Plasmarand auf. Bei Plasmadichten oberhalb von etwa $3 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro Kubikzentimeter löst sich das Plasma sogar teilweise

oder ganz von den Divertorplatten ab, da der Wärmefluss aus dem Plasma kurz vor den Divertorplatten über Strahlung gleichmäßig auf die Plasmaoberfläche verteilt wird. Damit verbunden ist die erwünschte und im Fusionskraftwerk notwendige Abnahme der Wärmebelastung der Divertorplatten (siehe Abbildung Seite rechts).

Während des Divertor- Einbaus wurde auch die Neutralteilchenheizung umgebaut, so dass sich die Heizleistung nun um ungefähr 40 Prozent erhöht hat. Zusammen mit einer verringerten Verunreinigungsstrahlung war damit eine weitere Erhöhung des Plasmadruckes bei niedrigem Magnetfeld möglich. Der für die Wirtschaftlichkeit eines Fusionskraftwerks so wichtige Beta-Wert konnte auf drei Prozent angehoben werden. Trotz dieser erheblichen Steigerung blieb das Plasma unverändert stabil, womit bestätigt werden konnte, dass der Advanced Stellarator günstige Stabilitätseigenschaften besitzt.

Ausschlaggebend für die Einschlussgüte einer Fusionsanlage ist der lokale Energie- und Teilchentransport. Er wird über die Energie- und Teilchenbilanz analysiert. Dazu werden lokale Energieaufnahme und Teilchenerzeugung mit gemessenen Plasmawerten, wie Temperatur- und Dichteprofilen, Neutralteilchendichten und Strahlungsprofilen verknüpft. Die so gewonnenen Transportkoeffizienten lassen sich mit Vorhersagen der theoretischen Modelle vergleichen, welche die besonderen Eigenschaften des Advanced Stellarator berücksichtigen. Im allgemeinen wurde eine gute Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse mit der Theorie gefunden: Die lokalen Werte für die Elektronen- und Ionenwärmeleitung sowie für den Teilchentransport werden durch die Optimierungsprinzipien im Zentralbereich des Plasmas gut beschrieben. Im Randbereich finden sich jedoch für die Elektronen deutliche Abweichungen - ähnlich wie bei Tokamaks. Die physikalische Ursache dieser erhöhten Verluste ist immer noch nur teilweise verstanden.

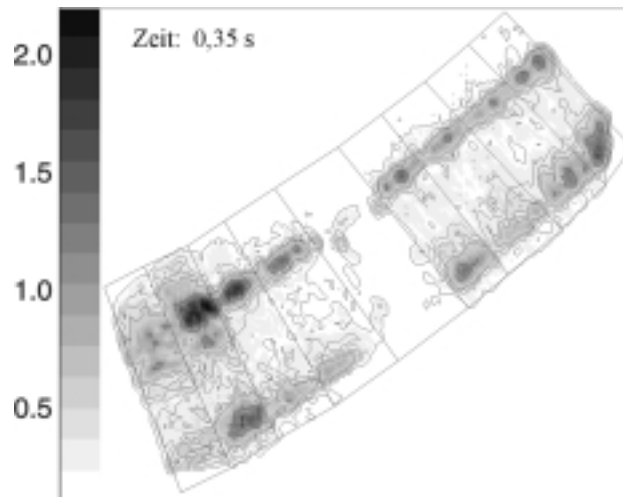
Zum Verständnis der Divertorexperimente mussten Computerprogramme weiterentwickelt oder neu geschrieben werden, die speziell die dreidimensionale Struktur und andere Eigenschaften des „Insel-Divertors“ berücksichtigen. Diese Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen; der Vergleich mit den Messergebnissen zeigt jedoch in vielen Fällen bereits gute Übereinstimmung.

Zur Beobachtung des Plasmas werden rund 40 Messeinrichtungen verwendet. Sie regis-

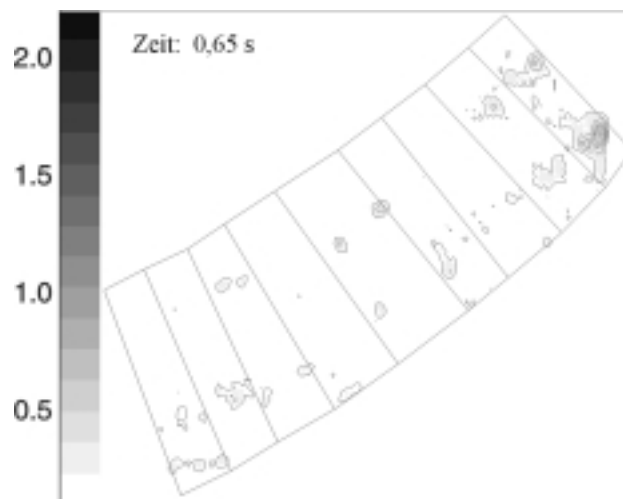
trieren - zum Teil mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung - Plasmadichte und Plasmatemperatur, die vom Plasma ausgesandte elektromagnetische Strahlung und Fluktuationen. Die komplizierte nicht-axialsymmetrische Plasmagestalt macht es manchmal notwendig, an unterschiedlichen Positionen des Plasmaringes zu messen und bestimmte Plasmawerte nicht auf den Radius, sondern auf magnetische Flächen zu beziehen. Dabei ist zusätzlich die Verformung der magnetischen Flächen durch den Plasmadruck zu berücksichtigen. Mit dem Einbau der Divertor-Module war eine erhebliche Erweiterung der vorhandenen Messeinrichtungen verbunden, zu der der IPP-Bereich in Berlin wesentliche Beiträge geliefert hat. Die gewonnenen Messdaten werden von dem im IPP entwickelten Datenerfassungssystem UDAS (Universal Data Acquisition System) aufgenommen, das seit seiner Einführung zuverlässig läuft. Pro Plasmaentladung werden bis zu 100 Megabyte an Daten gewonnen und zur Auswertung und Dokumentation in Hochleistungs-Workstations übertragen.

WENDELSTEIN 7-AS hat in den vergangenen Jahren den in Stellaratoren zugänglichen Parameterbereich erheblich erweitert. Zur Bewertung der experimentellen Ergebnisse wurden umfangreiche theoretische Arbeiten ausgeführt und vergleichende Datenbanken bereitgestellt. Dabei wurden auch die Rechenmodelle überprüft, die für das Konzept des Advanced Stellarator und speziell zur Festlegung des Nachfolgers WENDELSTEIN 7-X entwickelt wurden. In allen Fällen ergab sich eine gute Übereinstimmung im Rahmen der Messgenauigkeit, so dass die Weiterverfolgung der Entwicklungslinie gerechtfertigt ist. Ein besonders wichtiges Ergebnis war der Nachweis, dass im Divertorbetrieb schon in WENDELSTEIN 7-AS nahezu stationäre Entladungen bei hoher Plasmadichte und großer Heizleistung möglich sind. Damit hat sich die Entscheidung für supraleitende Magnetfeldspulen in WENDELSTEIN 7-X, mit denen die Entladungsdauer zu einem echt stationären Betrieb ausgedehnt werden kann, als richtig bestätigt.

Ende Juli 2002 wurden die Experimente an WENDELSTEIN 7-AS abgeschlossen.



Die Wärmebelastung der Divertorplatten nimmt bei Erhöhung der Plasmadichte ab. Links: 0,35 Sekunden nach Entladungsbeginn; unten: 0,3 Sekunden später. (Die Grauskala gibt die Wärmebelastung in Megawatt pro Quadratmeter an).



Fusionsexperiment WENDELSTEIN 7-X

Der Experimentvorschlag für den Stellarator WENDELSTEIN 7-X wurde 1990 formuliert und den zuständigen europäischen Gremien vorgelegt. Die endgültige positive Entscheidung zur ersten Phase des Genehmigungsverfahrens, in der die wissenschaftlichen Pläne für das Experiment und seine Einbettung in das europäische Fusionsprogramm begutachtet wurden, erging im Mai 1994. Die zweite Phase des Genehmigungsverfahrens - Begutachtung der Technik sowie der Kosten- und Personalschätzung - erfolgte 1995. Im Sommer 1996 begann der Aufbau des Projektteams und die Detaillierung des Maschinenentwurfs.

WENDELSTEIN 7-X wird in dem 1994 gegründeten IPP-Teilinstitut in Greifswald aufgebaut, dessen neue Gebäude 1999 ein-

Durchmesser der Anlage (über alles):	16 Meter
Höhe (über alles):	5 Meter
Gewicht:	725 Tonnen
Großer Plasmaradius:	5,5 Meter
Mittlerer kleiner Plasmaradius:	0,53 Meter
Plasmavolumen:	30 Kubikmeter
Plasmagewicht:	0,005 - 0,03 Gramm
Anzahl der modularen Spulen:	50
Anzahl der ebenen Zusatzspulen:	20
Magnetfeld (Achse):	3 Tesla
Rotationstransformation (Achse):	0,84
Versicherung:	0,1 - 0,14
Energieeinschlusszeit:	0,15
Heizleistung (erste Ausbaustufe):	15 Megawatt
Pulsdauer:	Dauerbetrieb für 30 Minuten mit Elektronenzyklotron- Heizung

Charakteristische Daten des Experimentes WENDELSTEIN 7-X

geweiht wurden. Ab 2004 werden hier rund 300 Mitarbeiter mit dem Aufbau und dem Betrieb von WENDELSTEIN 7-X beschäftigt sein. Der Zeitplan für die Montage der Anlage wird durch die Fertigungsgeschwindigkeit der supraleitenden Magnetspulen bestimmt und sieht die Inbetriebnahme etwa für das Jahr 2007 vor.

Das Experiment WENDELSTEIN 7-X soll die prinzipielle Kraftwerkseignung des Advanced Stellarator demonstrieren und so Konzeptverbesserungen für ein künftiges Stellaratorkraftwerk aufzeigen. Da Stellaratoren zum Einschluss des Plasmas keinen zirkulierenden Strom im Plasma benötigen, ist ihr Bauprinzip für den Dauerbetrieb eines Kraftwerks besonders geeignet. Ziel des Experiments ist es, ein heißes und dichtes Stellaratorplasma hinreichend lange einzuschließen, so dass die gewonnenen Ergebnisse

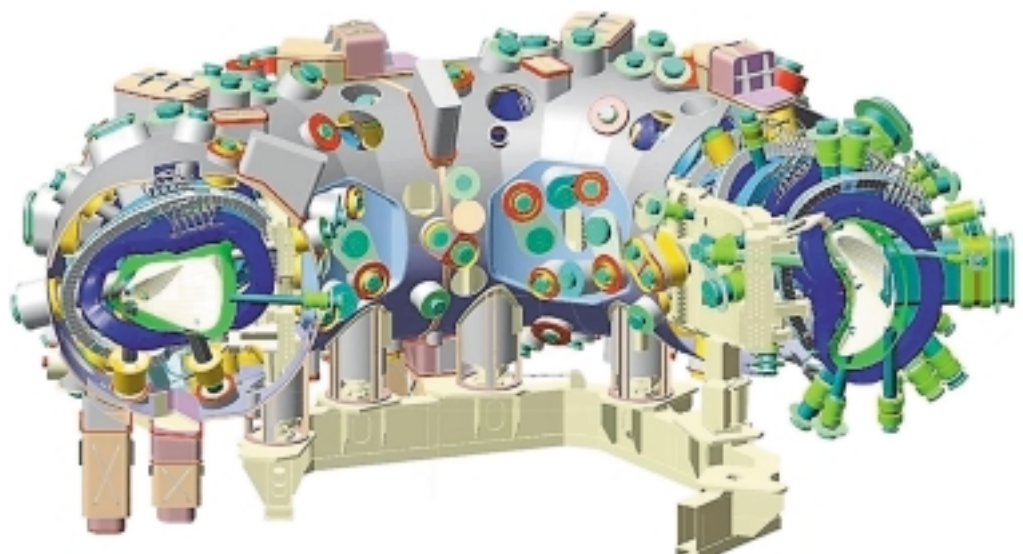
sichere Rückschlüsse auf ein Kraftwerksplasma zulassen.

Dazu gehört im Einzelnen, ein heißes und dichtes Wasserstoffplasma mit Temperaturen von rund 100 Millionen Grad und Beta-Werten von fünf Prozent in einem optimierten Magnetfeld einzuschließen, verschiedene Heizmethoden anzuwenden, stabilen Plasmaeinschluss zu zeigen sowie die Plasma-Wand-Wechselwirkung zu studieren und die Entstehung und den Abtransport von Verunreinigungen über längere Zeit zu kontrollieren.

Die Magnetfeldstruktur des WENDELSTEIN 7-X ist eine fünf-periodische Helias-Konfiguration (Helias = Helical Advanced Stellarator). Sie zeichnet sich unter anderem durch eine helikal gewundene magnetische Achse aus. Umfangreiche theoretische Untersuchungen haben die besondere Kraftwerkseignung dieser Konfiguration gezeigt: Die Lage der Plasmasäule im Gefäß ändert sich mit steigendem Plasmadruck nur sehr wenig, die Stabilitätsgrenze lässt mittlere Beta-Werte von 4,3 Prozent erwarten. Auch die schnellen Heliumkerne, die in einem brennenden Plasma für die Selbstheizung sorgen, werden in einer Helias-Konfiguration gut eingeschlossen. In WENDELSTEIN 7-X, der mit einem Plasma aus normalem Wasserstoff und Deuterium - also ohne Tritium - arbeiten wird, soll das Verhalten der Heliumkerne durch eingeschossene schnelle Wasserstoff-Teilchen mit Energien von 60 Kiloelektronenvolt simuliert werden.

Eingehende Untersuchungen befassten sich mit den Verlusten des Plasmas aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung der geladenen Plasmateilchen bei großen freien Weglängen. Dieser sogenannte neoklassische Verlust, der durch die Stöße zwischen den Plasmateilchen

**Der Aufbau von
WENDELSTEIN 7-X: Die
50 nichtebenen (blau)
und 20 ebenen Magnet-
spulen (grau) werden
auf Supraleitungs-
temperatur abgekühlt.
Für ihre Wärmeisola-
tion sorgt ein Kryostat
(grau). Dessen innere
Wand ist das
Plasmagefäß (grün).
Stützen (grün) zum
Anschluss von Mess-
geräten, Heizung und
Pumpen führen durch
den kalten
Spulenbereich.**



zustande kommt, ist in einem klassischen Stellarator so hoch, dass eine Zündung unmöglich wäre. In einer Helias-Konfiguration gelingt es jedoch, die Teilchenbahnen so zu gestalten, dass der neoklassische Verlust auf ein für die Zündung tolerables Maß vermindert werden kann. Besonderer Wert bei diesen Untersuchungen wurde auch auf die Eliminierung des Bootstrap-Stroms gelegt. Dieser Ringstrom, der sich aus der inneren Energie des Plasmas speist, könnte das Magnetfeld auf ungünstige Weise verändern. In der für WENDELSTEIN 7-X gewählten Konfiguration ist er jedoch auf unwesentliche Werte reduziert.

Ein wichtiges Thema für WENDELSTEIN 7-X ist die Plasma-Wand-Wechselwirkung und die Entwicklung eines Divertors. Dabei besitzt die optimierte magnetische Konfiguration Eigenschaften eines „natürlichen“ Divertors: Eng begrenzte magnetische Flussbündel winden sich um das Einschlussgebiet und laufen in Richtung der Gefäßwand. Anders als beim Tokamak sind keine zusätzlichen Magnetfelder nötig. Über Diffusionsvorgänge laufen Teilchen und Energie in diese Flussbündel und strömen parallel zum Magnetfeld auf fern vom heißen Plasma angebrachte Divertorplatten. Hier werden die geladenen Teilchen neutralisiert und mit Hilfe von Vakuumpumpen aus dem Plasmaraum abgesaugt. Durch geeignete Regelung der Gasdichte vor den Prallplatten wird die Produktion von Verunreinigungen verringert und gleichzeitig deren Rückfluss in das Plasma eingeschränkt. In detaillierten Berechnungen der Teilchenbahnen und Monte-Carlo-Rechnungen für die Neutralteilchen wurden unter Berücksichtigung der komplizierten Geometrie Größe und Lage der Prallplatten, Leitplatten und Kryopumpen für die zehn Divertoreinheiten von WENDELSTEIN 7-X bestimmt. Um die maximale Flächenbelastung von 10 Megawatt pro Quadratmeter nicht zu überschreiten, kann das Magnetfeld durch zusätzliche Regelspulen im Randbereich räumlich und zeitlich verändert werden.

Das modular aufgebaute Spulensystem setzt die bereits beim Vorgänger WENDELSTEIN 7-AS mit Erfolg verwirklichte Linie fort. Es besteht aus 50 nichtebenen Einzelspulen, die in fünf gleichen Modulen zu je zehn Spulen angeordnet sind. Da jeweils zwei Spulen eines Moduls gleich geformt, aber umgedreht angeordnet sind, gibt es insgesamt nur fünf geometrisch verschiedene Spulen. Dieser Spulensatz alleine wäre ausreichend, um das Plasma einzuschließen. Um die

Flexibilität des Experiments zu erhöhen und charakteristische Größen des Magnetfelds um bis zu zehn Prozent verändern zu können, wird den nichtebenen Spulen ein zweiter Satz von zwanzig ebenen Spulen überlagert. Die Abmessungen der Anlage sind in der Tabelle (links) zusammengestellt.

Wegen der angestrebten langen Pulszeiten wird das Magnetfeld von WENDELSTEIN 7-X - anders als beim Vorgänger - mit Hilfe von supraleitenden Spulen erzeugt. Diese Spulen sind das technische Kernstück der Anlage. Mit ihrer Hilfe soll WENDELSTEIN 7-X die wesentliche Stellaratoreigenschaft erreichen,

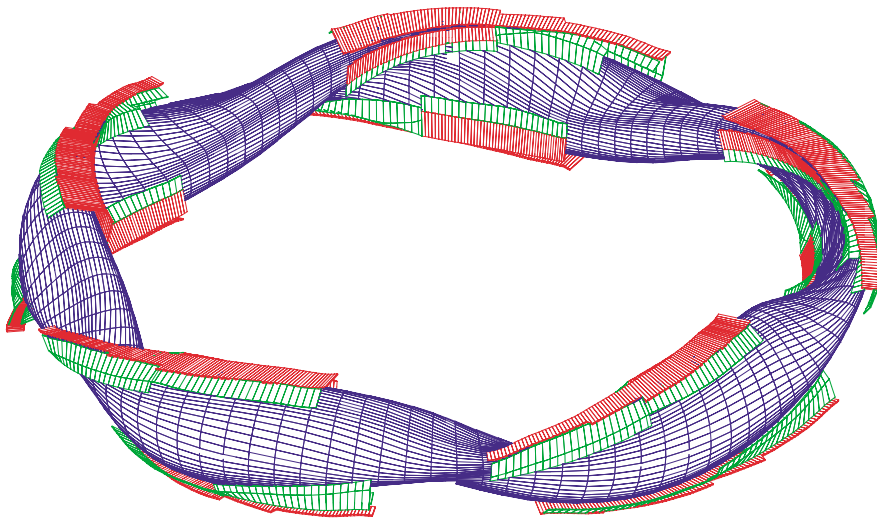


Foto: Forschungszentrum Karlsruhe

Die supraleitende Demonstrationsspule für WENDELSTEIN 7-X vor der Prüfung in der Testanlage TOSKA im Forschungszentrum Karlsruhe

den Dauerbetrieb. Wegen des relativ geringen Magnetfeldes von sechs Tesla auf den Spulen kann man für den Bau der WENDELSTEIN-Spulen auf supraleitende Standard-Drähte aus Niob-Titan zurückgreifen (siehe Kapitel „Magnetspulen“ Seite 20). Um den supraleitenden Zustand im Stromleiter aufrechtzuerhalten, muss er mit flüssigem Helium auf etwa 4 Kelvin nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt werden.

Alle sieben Einzelspulen des Magnetfeldsystems werden im französischen Forschungsinstitut der CEA in Saclay einer Funktionsprüfung bei Betriebsbedingungen unterzogen, bevor sie in die Experimentieranlage eingebaut werden. Dort sind sie an einer massiven Stützstruktur befestigt, damit die exakte Form des Magnetfelds auch bei den hohen elektromagnetischen Kräften zwischen den Spulen erhalten bleibt.



**Plasma und
Divertorplatten für
WENDELSTEIN 7-X**

Die tiefe Betriebstemperatur der supraleitenden Spulen erfordert eine wirksame Wärmeisolation gegenüber allen Bauteilen der Anlage, die sich auf Umgebungstemperatur befinden. Das gesamte Spulensystem ist daher in einem Kryostaten angeordnet, wo es durch eine Vakuumisolation und gekühlte Zwischenflächen wärmeisoliert wird. Die innere Wand des Kryostaten ist die Wand des Plasmagefäßes. Es ist mit mehr als dreihundert Öffnungen für Beobachtungs- und Heizstützen ausgestattet, die thermisch isoliert durch den kalten Spulenbereich hindurchgeführt werden.

Das Magnetfeld des Spulensystems von WENDELSTEIN 7-X speichert beim Betrieb des Experiments große Energiemengen von rund 600 Megajoule. Zum Schutz der Spulen wird daher ein zuverlässiges Abschaltssystem aufgebaut, das bei einer Störung der Stromversorgung oder dem plötzlichen Zusammenbruch des supraleitenden Zustandes diese magnetische Energie kontrolliert abbaut, indem es den Strom über schnelle Schalter zu Widerständen umleitet.

Die Aufheizung des Plasmas geschieht im Dauerbetrieb über Mikrowellenstrahlen mit einer Frequenz von 140 Gigahertz und einer Leistung von zehn Megawatt. Die Mikrowellen werden in speziellen Senderröhren, sogenannten Gyrotrons, erzeugt, über Metallspiegel umgelenkt und in das Plasma fokussiert. Dort heizen sie bevorzugt jene Elektronen, welche im Magnetfeld gerade in Resonanz zur eingestrahlten Frequenz rotieren.

Die Ionen des Plasmas können zusätzlich mit Radiowellen einer Leistung von vier Megawatt aufgeheizt werden. Durch die Neutralteilchenheizung, die energiereiche Wasser-

stoffatome einer Leistung bis zu 20 Megawatt in das Plasma hineinschießt, können die Temperatur und die Dichte des Plasmas weiter erhöht werden.

Zur Absicherung des technischen Entwurfs von WENDELSTEIN 7-X dienten umfangreiche Forschungsarbeiten. Zunächst wurde der Supraleiter in mehreren Schritten entwickelt und verbessert. Der Leiter besteht aus 243 Einzeldrähten, die in mehreren Stufen zu einem Seil gewunden werden. Diese Verseilung verhindert, dass sich die Einzeldrähte durch die hohen Lorentzkräfte im Magnetfeld gegeneinander bewegen können. Zur zusätzlichen Verstärkung wird das Seil in eine Aluminiumhülle eingeschlossen. Der Hohlraum zwischen den Drähten des Seils und der Aluminiumhülle wird als Kühlkanal für das flüssige Helium genutzt. Die Legierung der Aluminiumhülle wurde so ausgewählt, dass der Leiter im weichen Ausgangszustand gut gewickelt und danach durch Erwärmen auf 170 Grad Celsius ausgehärtet werden kann. In diesem versteiften Zustand kann er den starken Kräften beim Betrieb der Maschine



Der Testkryostat beim Zusammenbau

standhalten. Aus den Prototypenleitern wurden schließlich Zylinderspulen gewickelt und im Teststand STAR des Forschungszentrums Karlsruhe elektromagnetisch und hydraulisch bei den späteren Betriebswerten geprüft.

Zur weiteren Vorbereitung wurden eine supraleitende Prototypspule in Originalgröße und ein Teilstück des Kryostaten gefertigt, um die Herstellbarkeit und die Funktion der Bauteile bei Betriebsbedingungen nachzuweisen. Beim Bau der Prototypspule wie auch der späteren Serienspulen kommt es darauf an,

Foto: Balcke-Dürr AG

die Sollform innerhalb weniger Millimeter einzuhalten und den Stromleiter so zu versteifen, dass er den starken Lorentzkraften standhält. Bei der Fertigung müssen die einzelnen Leiterwindungen daher sehr präzise in ihre Wickelform gepresst werden. Zur elektrischen Isolation wird der Leiter wie auch das gesamte Wickelpaket mit Bandagen aus Glasfaser umwunden und zur Versteifung mit Epoxidharz imprägniert. Um das Wickelpaket zusätzlich zu verstärken, wird es in ein Stahlgehäuse eingeschweißt. Dabei konnte der Prototyp sowohl für die Spulenwicklung wie auch für die Gehäuseschalen eine Maßgenauigkeit von einem Promille erreichen. Der Zwischenraum zwischen den Spulenwicklungen und dem Stahlgehäuse wird mit Quarzsand und Epoxidharz ausgefüllt, so dass eine gleichmäßige Kraftübertragung vom Wickelpaket auf das Gehäuse gewährleistet ist.

Die Prototypspule wurde 1998 fertiggestellt und anschließend im Forschungszentrum Karlsruhe in der Spulentestanlage TOSKA geprüft. Dabei wurden bei Leiterströmen bis zu 19 Kiloampere die geforderten elektrischen Eigenschaften nachgewiesen. Um die elektromagnetischen Belastungen der Spulen während des späteren Betriebs von WENDELSTEIN 7-X zu simulieren, wurde die Prototypspule in TOSKA dem starken Magnetfeld der großen europäischen LCT-Spule (Large Coil Task) ausgesetzt. Auch unter höchsten Belastungen von 10,6 Megawatt blieben die Verformungen der Spule - wie zuvor berechnet - im elastischen Bereich.

Das Kryostat-Stück, ein Achtel des Stellarators in Originalgröße, sollte zeigen, dass das kompliziert geformte Plasmagefäß entsprechend den engen Maßtoleranzen gefertigt, der Zusammenbau des Kryostaten wie geplant ausgeführt und eine ausreichend gute Wärmeisolation der suprakalten Teile erreicht werden kann. Dazu wurden Außen- und Innenwand sowie Kühlleitungen, Kälteschild, Superisolation und die Stützen in Originalausführung gefertigt; die Spulen wurden durch Platzhalter ersetzt. Bereits beim Zusammenbau der Komponenten konnten wichtige Erkenntnisse für die Detailkonstruktion von WENDELSTEIN 7-X gewonnen werden. Die Messungen der Wärmeisolation beim abschließenden Test mit flüssigem Helium zeigten, dass die Vorgaben für den Wärmeeinfall auf die tiefkalten Teile von WENDELSTEIN 7-X erhöht und die Kühlung der Spulen verbessert werden muss.

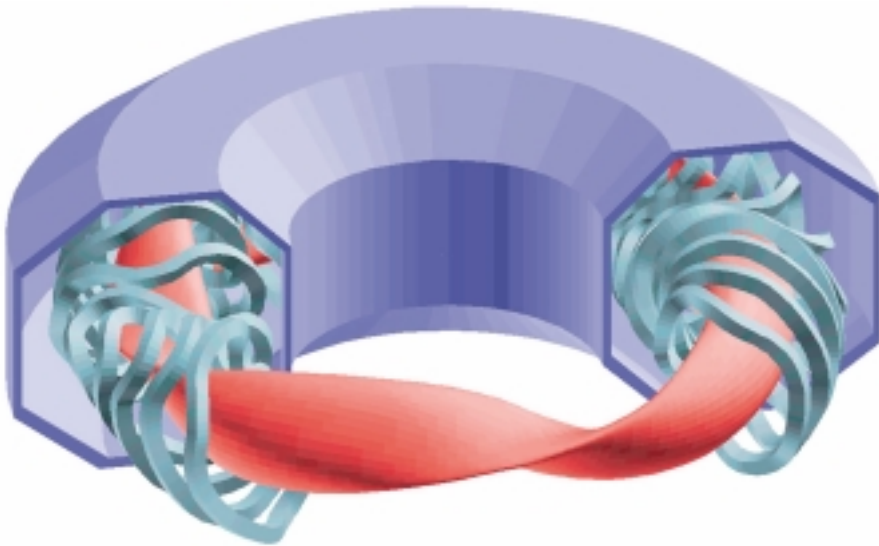
Entwicklungsbedarf bestand auch bei den Mikrowellensendern zur Aufheizung der



Das Prototyp-Gyrotron für WENDELSTEIN 7-X im Teststand in Karlsruhe

Foto: Forschungszentrum Karlsruhe

Elektronen. Diese Gyrotrons wurden bisher industriell nur für Heizpulse von wenigen Sekunden und Leistungen von einigen hundert Kilowatt gebaut. Das Plasma von WENDELSTEIN 7-X soll jedoch kontinuierlich durch zehn Mikrowellensender mit je einem Megawatt Ausgangsleistung geheizt werden. Dazu ist der Aufbau der Gyrotrons so zu verändern, dass die Ausgangsleistung bei verbessertem Wirkungsgrad erhöht und die Kühlung optimiert ist. Das Gyrotron verlassen die Mikrowellen durch Diamantfenster; sie werden dann durch eine Vielzahl von gekühlten Umlenkspiegeln zum Plasma übertragen. Das gesamte Mikrowellensystem wird durch das Forschungszentrum Karlsruhe beigestellt. Das Forschungszentrum koordiniert die Arbeiten, die im Verbund mit dem IPP in Garching und Greifswald, dem Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart, dem Fusionslaboratorium der Polytechnischen Hochschule in Lausanne und der europäischen Industrie ausgeführt werden. Im Jahr 2001 lieferte ein erster Gyrotron-Prototyp bei einer Frequenz von 140 Gigahertz mit gutem Wirkungsgrad eine Leistung von einem Megawatt für mehrere Sekunden. Bei geringeren Leistungen konnten die Heizpulse bis auf mehrere Minuten Dauer ausgedehnt werden.



Schema eines Stellaratorkraftwerks: Dargestellt sind das Plasma, die Magnet - spulen und der äußere Kühlmantel.

Das Stellaratorkraftwerk

Die seit 1992 laufenden Studien zu einem Stellaratorkraftwerk nach dem Helias-Prinzip zeigen, dass dieses Konzept eine echte Alternative zu einem Tokamakkraftwerk (siehe Seite 29) sein könnte. „Helias“ steht dabei für „Helical Advanced Stellarator.“ Der besondere Vorteil des Stellarators liegt in seiner Fähigkeit zum Dauerbetrieb und dem Fehlen eines toroidalen Plasmaströmes. Dadurch entfallen sowohl die Einrichtungen zum Erzeugen und Regeln dieses Stromes als auch die Gefahr einer Stromabbruchinstabilität.

Helias-Konfigurationen - wie das gegenwärtig im IPP-Teilinstitut Greifswald entstehende Stellaratorexperiment WENDELSTEIN 7-X -

zeichnen sich unter anderem durch eine helikal gewundene magnetische Achse aus. Das Hochrechnen der WENDELSTEIN-Konfiguration auf Kraftwerksgröße führt zu einem großen Plasmaradius von 22 Metern und einem mittleren kleinen Plasmaradius von 1,8 Metern. Modifiziert man die Konfiguration von WENDELSTEIN 7-X etwas und geht von fünf auf vier Feldperioden zurück, dann wird das Kraftwerk mit 18 Metern für den großen Radius und einem kleinen Plasmaradius von im Mittel 2,1 Metern kompakter und benötigt nur 40 anstelle von 50 modulare Spulen. Mit einem Magnetfeld von fünf Tesla im Plasma und zehn Tesla auf den Spulen ist das Feld klein genug, um die technisch einfach herzustellenden Niob-Titan-Supraleiter verwenden zu können. Die in dem Spulensystem gespeicherte Magnetfeldenergie, die auch ein ungefähres Maß für die Kosten des Spulensystems ist, liegt mit 100 Gigajoule etwas unterhalb der Magnetfeldenergie eines Tokamakkraftwerks.

Wegen der relativ großen Fläche der ersten Wand von 2600 Quadratmetern liegt die mittlere Belastung durch Neutronen unter einem Megawatt pro Quadratmeter, was sich günstig auf die Lebensdauer der Wandverkleidung auswirkt. Eine detailliertere Studie zu den technischen Komponenten wie Spulensystem, Blanket und Abschirmung soll zeigen, dass der Heliasreaktor eine konkurrenzfähige Alternative zu anderen Kraftwerkskonzepten ist.

Nach jetzigem Kenntnisstand sind die plasmaphysikalischen Bedingungen für die Zündung eines Heliaskraftwerks erfüllbar. Die theoretische Stabilitätsgrenze für den Plasmadruck liegt hoch genug, so dass bei den

angestrebten Plasmatemperaturen und -dichten ein magnetohydrodynamisch stabiler Betrieb zu erwarten ist. Numerische Rechnungen zeigen, dass die neoklassischen, d.h. stoßbestimmten Transportverluste deutlich niedriger liegen als bei herkömmlichen Stellaratoren, so dass sie die Zündung nicht beeinträchtigen. Für die anomalen Transportverluste liefern die gegenwärtigen Stellaratorexperimente mehrere Skalierungsgesetze, die in der Extrapolation zum Kraftwerk auf unterschiedliche Ergeb-

Durchmesser der Anlage (über alles):	50 Meter
Höhe (über alles):	15 Meter
Großer Plasmaradius:	18 Meter
Mittlerer kleiner Plasmaradius:	2,1 Meter
Plasmavolumen:	1600 Kubikmeter
Plasmagewicht:	0,2 - 1,5 Gramm
Anzahl der modularen Spulen:	40
Plasmastrom:	0
Magnetfeld (Achse):	5 Tesla
Maximalfeld (Spule):	10 Tesla
Neutronenwandbelastung:	≤ 1 Megawatt pro m ²
Pulsdauer:	Dauerbetrieb
Startheizung:	50 - 80 Megawatt
Fusionsleistung:	3000 Megawatt

Quelle: Studie zum Helias-Reaktor HSR4/18

Charakteristische Daten eines Stellaratorkraftwerks

nisse führen. Skalierungsgesetze, die allein auf Messungen in WENDELSTEIN 7-AS und dem japanischen Experiment LHD beruhen, bestätigen in der Hochrechnung auf den Heliasreaktor die Zündung. Ein Verbesserungsfaktor - wie zum Beispiel im H-Regime der Tokamaks - ist nicht notwendig.

Wegen der speziellen Eigenschaften der Heliaskonfiguration wird sogar noch eine Verminderung des anomalen Transports erwartet. Gewissheit über das Auftreten dieses Effektes kann aber nur das Experiment WENDELSTEIN 7-X liefern.

Allgemeine Arbeiten zur Fusion

Plasmaheizung

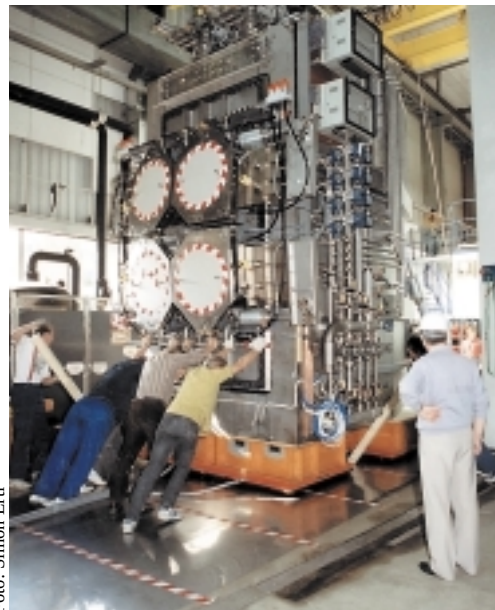
Die Entwicklung und der Einsatz von Plasmaheizverfahren an den Fusionsexperimenten des IPP - ASDEX Upgrade, WENDELSTEIN 7-AS und WENDELSTEIN 7-X - ist die Aufgabe des Bereichs Technologie. Auch in einem künftigen Fusionskraftwerk wird die richtige Energie- bzw. Leistungseinkopplung in das Fusionsplasma wichtig sein. Zur Zündung des Fusionsfeuers muss zunächst für einige zehn Sekunden die vergleichsweise „geringe“ Leistung von 50 bis 100 Megawatt von außen zugeführt werden, um die Fusionsreaktionen und damit die Selbstheizung des Plasmas einzuleiten. Mit erfolgter Zündung sollte dann die im Plasma frei werdende Heizung durch die Heliumkerne auf ihren Endwert von etwa 500 Megawatt angestiegen sein, um so die hohen Fusionstemperaturen selbständig aufrechtzuerhalten.

Heizsysteme werden jedoch nicht nur zur Heizung des Plasmas sondern auch zum nicht-induktiven Stromtrieb angewandt. So kann das den Energieeinschluss bestimmende Stromprofil kontrolliert werden und ein stationärer Tokamakbetrieb erreicht werden.

Im Gegensatz zum Kraftwerk spielt die innere Fusionsheizung in den derzeitigen Fusionsexperimenten bei der Leistungsbilanz noch keine Rolle. Dementsprechend muss das Plasma in den Tokamak- oder Stellarator-Experimenten durch die äußere Heizung nicht nur gestartet, sondern die noch fehlende, viel höhere innere Heizung durch die Helium-

kerne gewissermaßen von außen „simuliert“ werden. Nimmt man die genannten 500 Megawatt als Bezugsgröße, so fällt der in diesen Experimenten nötige Heizungsanfangsbetrag bereits erheblich ins Gewicht. Da - je nach physikalischer Fragestellung - Volumen, Oberfläche oder auch Plasmaumfang als Maß genommen werden müssen, erreicht die Heizleistung die Größenordnung von einigen zehn Megawatt.

Der Heizungsanfangsbetrag erhöht sich noch weiter dadurch, dass bei den Plasmaexperimenten mehrere unterschiedliche Heizverfahren zugleich einzusetzen sind, um entweder die Plasmaionen oder die Elektronen gezielt zu heizen, oder - wie bei der Neutralteilcheninjektion - zugleich auch neue Teil-



Die Neutralinjektionsbox für ASDEX Upgrade beim Transport.

Foto: Simon Ertl



Blick auf zwei Antennen der Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung im Plasmagefäß von ASDEX Upgrade

chen in das Plasmainnere einzufüttern. Da die Frage der optimalen Plasmaheizung für ein Fusionskraftwerk noch nicht beantwortet ist, kommt auch dem Vergleich unterschiedlicher Heizverfahren an ein und derselben Plasmaanlage große Bedeutung zu.

An den zwei großen IPP-Experimenten ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN 7-AS wurden in den letzten Jahren die Plasmaheizungen weiter ausgebaut und neue Heizsysteme erfolgreich in Betrieb genommen. Die Tabelle gibt einen Überblick über die eingesetzten Heizverfahren - Neutralteilcheninjektion, Elektronen- und Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung.

Die Neutralteilcheninjektion ist ein seit vielen Jahren erprobtes Verfahren, um Energie und Teilchen in Plasmen einzukoppeln. Obwohl das Grundprinzip der Neutralteilcheninjektion einfach ist (siehe Abschnitt "Plasma-

heizung"), ist die Realisierung eines zuverlässig arbeitenden Hochleistungsinjektors dennoch eine Herausforderung. Ein Beispiel ist die Herstellung des Ionenstrahls: Die beiden Injektoren für ASDEX Upgrade besitzen je vier Plasmaquellen, aus denen die positiv geladenen Wasserstoffionen abgesaugt und durch drei hintereinander liegende Elektroden beschleunigt werden. Um die verlangte Heizleistung zu erzielen, ist ein hoher Strahlstrom von 85 Ampere notwendig. Aus einer einzelnen Elektrodenöffnung gezogen, wäre dieser Strom durch die entstehende Raumladung begrenzt. Deshalb werden mehrere 100 Einzelstrahlen aus ebenso vielen Öffnungen einer gemeinsamen Elektrode herausgezogen. Die feinen Einzelstrahlen verschmelzen anschließend zu einem Gesamtstrahl mit etwa teller-großem Querschnitt.

Die Gitterelektroden sind ein handwerkliches Meisterstück: Mit höchster Präzision gefertigt, hält eine ausgefeilte Wasserkühlung jede einzelne Öffnung trotz der hohen Wärmebelastung während des Heizpulses auf hundertstel Millimeter relativ zu ihrem Partner im folgenden Gitter in Position. Inzwischen arbeiten diese Injektoren sehr erfolgreich und zuverlässig. Mit 14 (statt 12) Megawatt in Wasserstoff und über 20 (statt 18) Megawatt in Deuterium konnte die vorgesehene Nennleistung sogar deutlich überschritten werden. Die Abbildung auf Seite 67 zeigt die 50 Tonnen schwere Injektorbox auf dem Transport zum Experiment.

Der zweite Injektor ist ausgestattet mit neu entwickelten Hochfrequenz-Ionenquellen - mit maximal je 90 Ampere Strahlstrom und bis zu 100 Kilovolt Extraktionsspannung. Durch Einbau von vier weiteren Ionenquellen wurde inzwischen auch die Leistung der zwei kleineren Neutralstrahlinjektoren am Experiment WENDELSTEIN 7-AS aufgestockt. Zusätzlich wurde die ursprüngliche Anordnung der beiden Injektoren umgestellt: die Injektoren schießen die Neutralteilchen nun nicht mehr gegensinnig sondern im gleichen Drehsinn ein. Mit dieser Maßnahme und der Leistungsverdoppelung auf etwa drei Megawatt kommt die erreichbare Plasmaenergie an die für den Stellarator vorhergesagte Stabilitätsgrenze heran.

Die Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung (ICRH) koppelt Wellenenergie im Bereich der Ionen-Zyklotron-Frequenzen von typisch 30 bis 80 Megahertz in das Plasma ein, um die mit der jeweiligen Frequenz resonanten Ionen gezielt zu beschleunigen. An ASDEX Upgrade stehen vier Hochfrequenz-Generatoren mit



Schwenkbare Spiegelsystem im Plasmagefäß von ASDEX Upgrade zur Einkoppelung von Mikrowellen

je zwei Megawatt maximaler Ausgangsleistung zur Verfügung. Die Hochfrequenz-Leistung wird über längere Koaxialleitungen bis zum Plasmagefäß übertragen und hier über vier Antennen mit jeweils zwei Dipolschleifen in das Plasma eingestrahlt. Die Abbildung links zeigt zwei dieser Antennen, wobei die Sicht auf die eigentlichen Dipolschleifen durch eine Vielzahl von parallelen Stäben verdeckt ist. Diese sogenannten „Faraday-Stäbe“ wirken als Polarisationsfilter und sorgen für die richtige Ausrichtung, d.h. Polarisation, der abgestrahlten Wellen.

Da die Wellenausbreitung stark von den Plasmawerten abhängt, stellt die effiziente Einkopplung der Hochfrequenzleistung ins Plasma ein größeres Problem dar, das durch die vielfach auftretenden Instabilitäten des Plasmarandes, sogenannte „Edge Localized Modes“, noch zusätzlich erschwert wird. Für die ICRH-Antennen bewirken diese Schwankungen des Plasmarandes starke Lastwechsel, die den Volllastbetrieb der Hochfrequenz-Systeme bisher unmöglich machten. Aus diesem Grunde konnten auch an ASDEX Upgrade bisher nur zwei Drittel der erwarteten maximalen Heizleistung von sechs Megawatt erreicht werden. Inzwischen wurden jedoch neue, schnell reagierende Last-Anpassungskonzepte entwickelt, so dass in neueren ICRH-Experimenten deutliche Verbesserungen erzielt werden konnten.

Entsprechend dem Verhältnis von Ionen- zu Elektronenmasse liegt die Frequenz der Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizung (ECRH) über 1000mal höher im Bereich der Mikrowellen. Dieses Höchstfrequenzheizverfahren ist ausschließlich auf die Plasmaelektronen ausgerichtet und wurde schon seit Beginn der 80er Jahre - als Gemeinschaftsvorhaben des Instituts für Plasmaforschung der Universität Stuttgart und des Garching Stellarator-Teams - erfolgreich an den Stellaratoren WENDELSTEIN 7-A und WENDELSTEIN 7-AS eingesetzt. Inzwischen hat in enger Zusammenarbeit dieser Gruppen ein entsprechendes ECRH-Programm auch am Tokamak ASDEX Upgrade begonnen. Beteiligt an diesem Programm sind außerdem das Institute for Applied Physics in Nishni Nowgorod, das auf dem Gebiet der Hochleistungs-Millimeter-Wellenröhren, der so genannten Gyrotrons, weltweit führend ist.

An ASDEX Upgrade ist eine ECRH-Anlage mit viermal 0,5 Megawatt bei 140 Gigahertz und einer Pulslänge von zwei Sekunden in Betrieb; eine größere Anlage mit zehn Sekunden Pulslänge wird vorbereitet. Die Mikrowellen bieten die Möglichkeit, die Plasmaelektronen sehr lokalisiert zu heizen. Damit könnten durch Leistungsmodulation der Gyrotrons Wärmewellen im Plasma angeregt werden, die Aufschluss über die Elektronenwärmeleitfähigkeit geben. Es hat sich gezeigt, dass sie nichtlinear vom Temperaturgradienten abhängt, wie es von Turbulenztheorien vorher gesagt wird - ein wichtiger Beitrag zur Aufklärung des anomalen Wärmetransports.

Durch Einstrahlen von ECRH-Wellen schräg zum Magnetfeld kann außerdem lokal ein Gleichstrom getrieben werden. Damit ist es geglückt, Plasmainstabilitäten zu unterdrücken, die den Energieeinschluss verschlechtern. In gleicher Weise kann durch ECRH-Stromtrieb das globale Stromprofil im Plasma verändert werden und das Plasma in ein anderes Einschlussregime - zum Beispiel das „Advanced Tokamak-Regime“ - gebracht werden.

Grundparameter der an WENDELSTEIN 7-AS und ASDEX Upgrade eingesetzten Heizverfahren

		WENDELSTEIN 7-AS	ASDEX Upgrade
Neutralteilchen- heizung	max. Teilchenenergie (Kiloelektronenvolt)	50 (H^0)	65 (100) (D^0)
	Leistung (Megawatt)	3	20
	max. Pulslänge (Sekunden)	3	10
Ionen-Zyklotron- Resonanz *	Frequenz (Megahertz)	30 - 80	30 - 80
	Leistung (Megawatt)	1	8
	max. Pulslänge (Sekunden)	1	5
Elektronen-Zyklotron- Resonanz	Frequenz (Gigahertz)	70 und 140	140 (105-140)
	Leistung (Megawatt)	0,5 und 1 (2)	2 (4)
	max. Pulslänge (Sekunden)	3	2 (10)
*) an WENDELSTEIN 7-AS seit Anfang 2000 außer Betrieb			



**Blick in das Plasma-
gefäß von ASDEX
Upgrade. Die dunklen
Graphitziegel sind mit
Wolfram beschichtet.**

Plasma-Wand- Wechselwirkung

Im Bereich Oberflächenphysik werden die Belastungen untersucht, denen die dem Plasma zugewandten Oberflächen des Plasmagefäßes ausgesetzt sind. Insbesondere treffen fortwährend Teilchen aus dem heißen Wasserstoffplasma auf die umgebenden Wände, wobei sie Atome des Wandmaterials herausschlagen können. Diese Teilchen können in das Plasma eindringen und führen dort als Verunreinigungen zu Energieverlusten. Sie nehmen nämlich durch Stöße mit den Plasmateilchen Energie auf, die sie in Form von Lichtstrahlung wieder freigeben. Dies führt zu unerwünschter Kühlung des Plasmas. Darüber hinaus führt ein zu großer Anteil an Verun-

reinigungen zur Verdünnung des Fusionsbrennstoffs und damit zum Absinken der Fusionsleistung. Die Wechselwirkungen zwischen Plasma und Wand werden vornehmlich in Laborexperimenten untersucht, um die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse aufzuklären und die zugehörigen atomaren Daten zu bestimmen. Darüber hinaus werden an den Fusionsanlagen direkt die Teilchenflüsse zu den Wandkomponenten und die daraus resultierenden Veränderungen der Wandoberfläche untersucht.

Bei der Auswahl von Materialien für Fusionsmaschinen muss man zwei Bereiche des Plasmagefäßes bezüglich der Art der Belastung durch einfallende Teilchen unterscheiden: In der Plasmahauptkammer handelt es sich bei den einfallenden Teilchen hauptsächlich um neutrale Atome, die im Plasma durch Umladungsprozesse erzeugt werden. Sie besitzen Energien bis zu einigen zehn Kiloelektronenvolt und Flussdichten im Bereich von 10^{20} Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde. Dagegen sind im Divertorbereich, wo die Plasmaionen abgeführt werden, die Targetplatten einem hohen Ionenfluss bis zu einigen 10^{23} Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde ausgesetzt, jedoch wesentlich geringeren Energien unter 100 Elektronenvolt.

In heutigen Fusionsexperimenten wird in der Regel Kohlenstoff als Material für plasmabelastete Wandkomponenten sowohl im Divertor als auch in der Hauptkammer verwendet. Bei diesem Element führen die aus der Materialerosion stammenden Verunreinigungen im Plasma nur zu vergleichsweise geringen Strahlungsverlusten, so dass optimale Plasmabedingungen erreicht werden können. In einem Fusionskraftwerk ist die Verwendung von Kohlenstoff jedoch problematisch, da bei der Wiederablagerung erodierter Kohlenstoffatome das radioaktive Brennstoffisotop Tritium in größeren Mengen fest gebunden wird. Am Tokamak ASDEX Upgrade wird aus diesem Grund Wolfram als alternatives Material für plasmabelastete Komponenten untersucht. Wolfram weist wesentlich niedrigere Abtragungsraten als Kohlenstoff auf. Durch seine hohe Kernladungszahl verursacht es jedoch wesentlich stärkere Strahlungsverluste, so dass die tolerierbare Konzentration um einen Faktor 1000 unter der von Kohlenstoff liegt. Die Eignung von Wolfram als Wandmaterial war deshalb zunächst in Frage gestellt und musste untersucht werden.

Für den Divertorbereich konnte an ASDEX Upgrade die Verwendbarkeit von Wolfram

bereits erfolgreich demonstriert werden. Wünschenswert wäre die Verwendung von Wolfram jedoch auch für Wandkomponenten in der Plasmahauptkammer. Dazu wurde an der Abdeckung der inneren Hauptkammerwand von ASDEX Upgrade in den letzten Experimentierkampagnen Wolfram mit stetig zunehmendem Flächenanteil benutzt. Auf die verwendeten Graphitziegel wurde dafür eine Wolframschicht mit einer Dicke von einem Mikrometer aufgedampft (siehe Abbildung links).

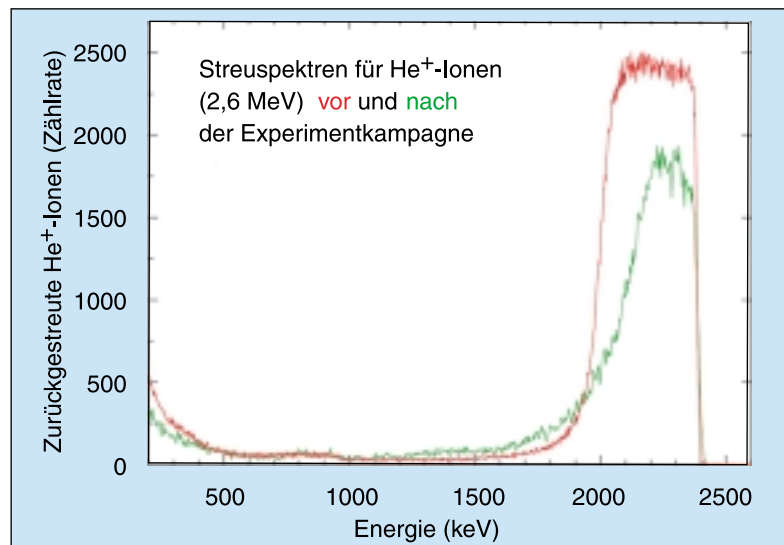
Die bisherigen Experimente haben gezeigt, dass auch in diesem Bereich die Erosion von Wolfram nicht zu Konzentrationen über der Toleranzschwelle im Plasma führt. Allerdings stellte sich heraus, dass die gemessene Erosion wesentlich stärker war als ursprünglich aufgrund des vergleichsweise geringen Flusses von Umladungsatomen angenommen wurde. Zur Quantifizierung der Erosionsrate und zur Erkundung der beteiligten Prozesse wurde die Erosion durch Messung der Wolframschichtdicke vor und nach der Experimentierkampagne mittels Ionenstrahlanalyse bestimmt. Die Abbildung rechts zeigt das Energiespektrum von Heliumionen, die an den beschichteten Ziegeln zurückgestreut wurden. Die Fläche unter dem zur Wolframschicht gehörenden Signalanteil entspricht näherungsweise der Schichtdicke. Bei dem nach der Experimentierkampagne aufgenommenen Spektrum hat sich, wie die Abbildung zeigt, die Wolframmenge deutlich vermindert.

Entsprechende Messungen wurden an einer ganzen Reihe von Ziegeln ausgeführt, um die räumliche Verteilung der Erosionsrate zu bestimmen. Dabei beobachtet man starke Variationen der Erosionsrate selbst auf einzelnen Ziegeln. Daraus kann man schließen, dass die Erosion nicht durch den Einfall neutraler Atome erfolgen kann, da deren räumliche Verteilung sehr homogen ist. Durch Analyse der Magnetfeldlinien, entlang derer sich die eingeschlossenen Plasmateilchen bewegen, kann man zeigen, dass die Oberflächenbereiche mit starker Erosion von Feldlinien geschnitten werden, die aus der Plasmazone kommen, während Bereiche geringer Erosion entlang der Feldlinien abgeschattet sind. Die beobachtete Erosion kann also im wesentlichen auf den Einfall von Ionen aus dem Plasma zurückgeführt werden.

Messungen der Ionentemperaturen an den betrachteten Oberflächen deuten jedoch darauf hin, dass die Energie der einfallenden Deuteriumionen nicht ausreicht, um Wolfram

nennenswert abzutragen. Die Erosion kann deshalb nicht durch Deuteriumionen, sondern muss durch Kohlenstoffionen erfolgen, die noch immer als Verunreinigung im Plasma vorhanden sind. Eine ähnliche Beobachtung wurde früher bereits im Wolfram-Divertor gemacht. Für die in Zukunft geplanten Experimente sollen deshalb die noch vorhandenen Kohlenstoffkomponenten durch Wolfram ersetzt werden. Mit dem damit einhergehenden Rückgang der Kohlenstoffkonzentration im Plasma ist zu erwarten, dass sich die Wolframerosionsrate entsprechend weiter vermindern wird.

Streuspektren von Heliumionen an Wolfram-beschichteten Graphitziegeln der Hauptkammerwand von ASDEX Upgrade vor (rot) und nach (grün) einer Experimentierkampagne. Die Änderung der Fläche unter der Messkurve ist ein Maß für die Abnahme der Wolframbeschichtung.



Materialforschung

Plasmabelastete Materialien unterliegen in Fusionsanlagen hohen Belastungen durch die Wärmeabstrahlung aus dem Plasma und durch energiereiche Plasmateilchen wie Elektronen, Ionen und Atome, die auf die Materialoberfläche treffen. Hierdurch entstehen hohe Wärmeflüsse, die von der Materialoberfläche abgeführt werden müssen. Zusätzlich wird das plasmabelastete Material durch die auftreffenden Plasmateilchen abgetragen, was die Lebensdauer der plasmabelasteten Komponenten stark verringern kann. In einem Fusionskraftwerk werden überdies hohe Flüsse von Fusionsneutronen erzeugt, die auf ihrem Weg durch die plasmabelasteten Komponenten Strahlenschäden verursachen. Die Forschungsarbeiten im Bereich Materialforschung befassen sich daher mit der Entwicklung und Untersuchung von möglichst

**Wandverkleidung für
WENDELSTEIN 7-X mit
Borcarbid-Beschichtung
(Prototyp)**



robusten Materialien für die plasmabelasteten Komponenten von Fusionsanlagen.

Plasmabelastete Materialien:

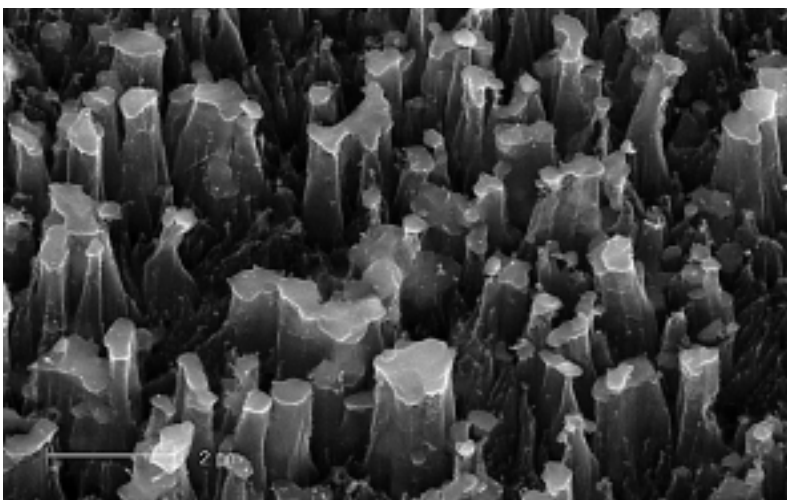
In gegenwärtigen Fusionsanlagen werden vornehmlich Materialien mit niedriger Kernladungszahl Z wie Kohlenstoff oder Beryllium eingesetzt. Wird die Oberfläche der Materialien bei Plasmakontakt erodiert, so können Atome des Wandmaterials ins Plasma eindringen. Wegen der geringen Kernladungszahl sind bei den hohen Plasmatemperaturen jedoch nur noch wenige bzw. keine Elektronen an die Atomrümpfe gebunden. Daher entsteht nur begrenzte Strahlung am kälteren Plasmarand, die zu einem tolerierbaren Leistungsverlust aus dem Plasma führt. So werden für die Erste Wand von WENDELSTEIN 7-X Borcarbidschichten entwickelt, die auf großflächigen, dreidimensional geformten Wandbauteilen aus Edelstahl aufgebracht werden können. Für diese Anwen-

dung wurden erstmalig plasmagespritzte Schichten mit einer Schichtstärke bis zu 0,5 Millimeter auf großflächige Wandbauteile aufgebracht. Borcarbid hat gegenüber Kohlenstoff den Vorteil, dass es gegen den chemischen Angriff durch das Wasserstoffplasma resistent ist. Unter zyklischen Wärmebelastungen in einer Testanlage des Forschungszentrums Karlsruhe zeigten die mit Borcarbid beschichteten Bauteile keine Schädigung.

Für Komponenten, deren Oberfläche hohen Wärmelasten ausgesetzt ist - zum Beispiel die Divertorplatten - bieten sich Graphite und kohlefaserverstärkte Kohlenstoffe an. Einen Weg, die Vorteile des Graphits wie hohe thermische Stabilität und gute Wärmeleitfähigkeit zu nutzen und die chemische Erosion durch den Wasserstoffangriff zu reduzieren, weisen dotierte Graphite auf. Karbid-dotierungen bilden durch ihre Anreicherung an der belasteten Oberfläche einen wirkungsvollen Schutz des graphitischen Matrixmaterials. Der Wasserstoff aus dem Plasma trifft vornehmlich auf die an der Oberfläche befindlichen Karbide und kann nicht mit dem freien Kohlenstoff des Graphits zu Methan reagieren. Zusätzlich können, je nach Karbid, chemische Oberflächenprozesse die Reaktivität des Graphits beeinträchtigen, so dass bei erhöhten Temperaturen eine weitere Verringerung der chemischen Erosion erreicht wird.

Trotz seiner hohen Kernladungszahl ist jedoch auch ein Material wie Wolfram von großem Interesse für die Anwendung in Fusionskraftwerken. Als schweres Element ist Wolfram einer wesentlich geringeren Zerstäubungserosion durch Wasserstoff-

**Erodierte Graphit-
oberfläche nach Belas-
tung mit Deuterium-
ionen. Man erkennt
Titankarbidkörner
auf den Spitzen der
Graphitnadeln.**



teilchen unterworfen. Die Lebensdauer von Wolfram-beschichteten Komponenten könnte daher auch für den Betrieb eines Kraftwerks ausreichend sein. Da wegen der hohen Kernladungszahl nur sehr geringe Verunreinigungskonzentrationen im Plasma toleriert werden können, wurde in ASDEX Upgrade die Plasmaverträglichkeit von Wolfram untersucht. Die dazu entwickelten dünnen Wolframschichten hafteten auch unter hohen thermischen Belastungen gut auf Graphit und auf Kohlefaser-verstärktem Kohlenstoff. Weitere Informationen zu Wolfram als Wandmaterial finden sich im Kapitel „Plasma-Wand-Wechselwirkung“.

Dünne Sperrschichten:

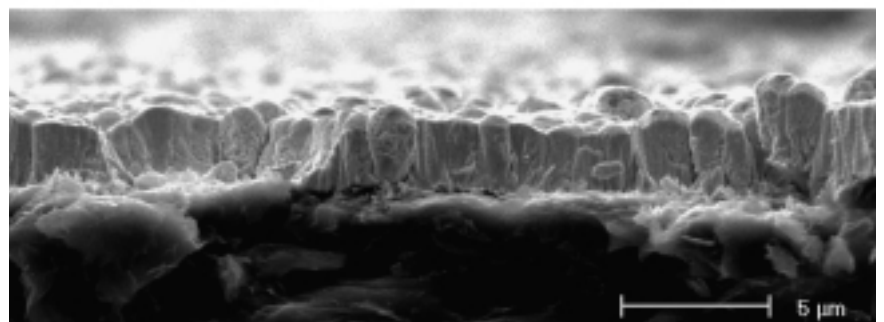
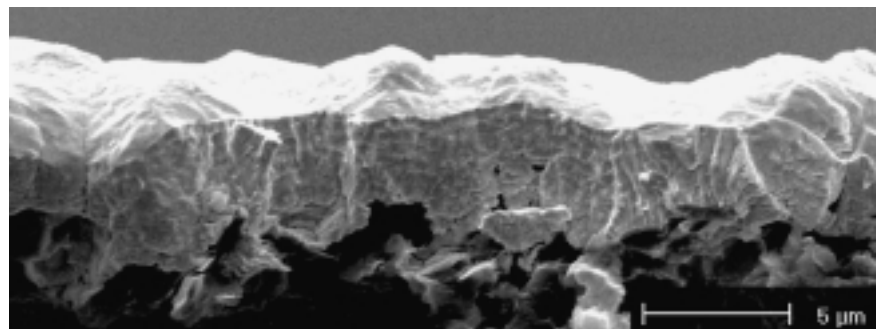
Wasserstoffisotope können sich in vielen metallischen Materialien leicht ansammeln oder auch durch sie hindurch treten. Im Falle von Tritium ist diese Permeation unerwünscht, da in einer Fusionsanlage das Tritiuminventar möglichst begrenzt und lokalisierbar sein muss. Dünne oxidische Beschichtungen auf Metallen können jedoch zu einer sehr starken Absenkung der Wasserstoffpermeation führen. Derartige Sperrschichten aus Aluminiumoxid werden im IPP gezielt durch einen atomaren Plasmaprozess abgeschieden. Durch die Einstellung der Ionenenergie während der Abscheidung konnte dabei eine stabile kristalline Mikrostruktur der Schicht erreicht werden.

Metall-Matrix Komposite:

Die Verstärkung von Metallen wie Kupfer oder niedrig-aktivierbarer Stahl durch keramische Fasern, insbesondere aus Silizium-

karbid, könnte zu thermisch hochbelastbaren Werkstoffen mit hoher Festigkeit führen. Grundlagenuntersuchungen sollen zeigen, ob diese Materialklasse, die insbesondere für die Luftfahrt entwickelt wurde, auch für die Anwendung in Fusionsanlagen angepasst werden kann. Dabei ist die Entwicklung der Grenzflächeneigenschaften zwischen der Faserverstärkung und der metallischen Matrix von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften des Verbundmaterials. Entsprechend werden im IPP Modellkomposite synthetisiert, an denen die Phasenbildung an inneren Grenzflächen und die mikromechanischen Eigenschaften untersucht werden können.

Dünne Wolframschichten, die durch unterschiedliche Verfahren abgeschieden wurden; oben: Verdampfung in einem Lichtbogen, unten: Magnetron-Zerstäubung. Die Mikrostruktur der abgeschiedenen Schichten ist in hohem Maße prozessabhängig.



Plasmatechnologie

Die Gruppe „Plasmatechnologie“ verfolgt drei Aufgaben: Mit Hilfe plasmachemischer Verfahren werden Oberflächen vergütet und Beschichtungen hergestellt, die in den Fusionsanlagen des Instituts benötigt werden. Falls notwendig, werden hierfür spezielle Beschichtungsverfahren entwickelt oder verbessert. Da dies ein tieferes Verständnis der zugrundeliegenden chemischen und physikalischen Vorgänge erfordert, werden Plasma- und Schichteigenschaften systematisch analysiert und mikroskopische Prozesse der Plasma-Oberflächen-Wechselwirkung untersucht.

Intensiv beschäftigt man sich zum Beispiel mit amorphen wasserstoffhaltigen Kohlenstoffschichten, die sowohl kommerziell genutzt als auch in den großen Fusionsexperimenten zum Schutz der metallischen Gefäßwände eingesetzt werden. Das Abtragen und an anderer Stelle wieder Ablagern solcher Schichten in einem Plasma, also Deposition und Erosion, wird mit einem neuartigen, zum Patent angemeldeten Messverfahren untersucht, das auf der spektroskopischen Ellipsometrie beruht. Das hochempfindliche optische Verfahren kann die Eigenschaften eines Schichtsystems sehr genau und in-situ vermessen, d.h. während die Schichten dem Plasma ausgesetzt sind. Damit wurde das Aufwachsen und Abtragen von wasserstoffhaltigen Kohlenstoffschichten

Zur Simulation mikroskopischer Vorgänge an der Gefäßwand von Fusionsexperimenten werden in dieser Anlage amorphe Kohlenwasserstoff-Schichten hergestellt und während des Wachstums durch ausgefeilte Messverfahren beobachtet.

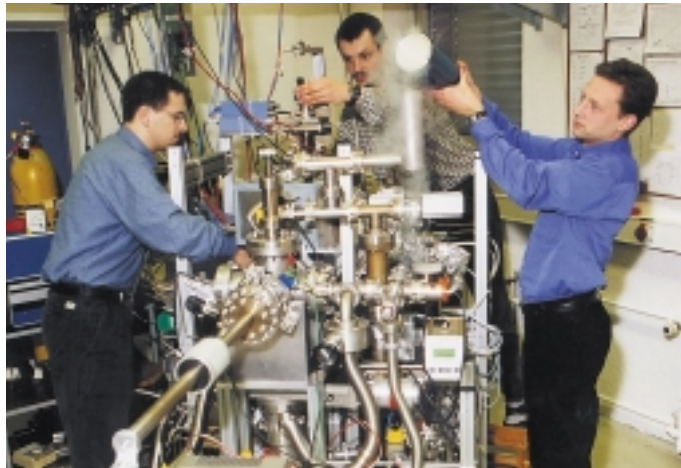
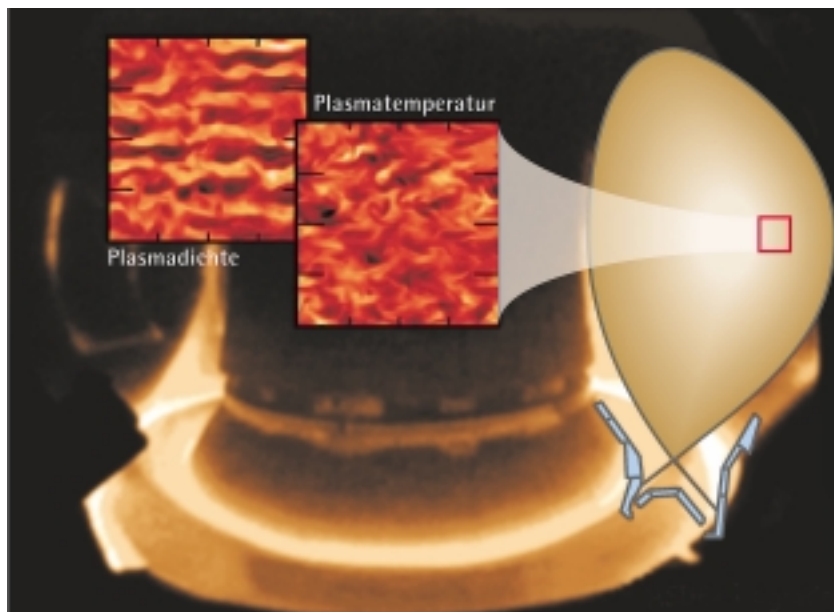


Foto: Doris Beirer

in Abhängigkeit von der Energie der auftretenden Plasmaionen und der Temperatur des Substrats untersucht. Im allgemeinen stieg die Erosionsrate mit zunehmender Ionenenergie und steigender Substrattemperatur, wobei allerdings im Detail überraschende Abweichungen entdeckt wurden.

Insbesondere die Wechselwirkungen von atomarem Wasserstoff und Kohlenwasserstoff-Radikalen mit Kohlenstoff-Oberflächen spielen in der Randschicht und im Divertor von Fusionsexperimenten eine wichtige Rolle und sind bei der Auslegung künftiger Anlagen

zu berücksichtigen. Deshalb werden diese Prozesse in Modellexperimenten intensiv untersucht. Eine ganze Reihe mikroskopischer Prozesse wurde in den letzten Jahren detailliert analysiert und teilweise quantitativ aufgeklärt. Insbesondere konnte das Haftvermögen von Methyl-Radikalen auf der Oberfläche von Kohlenwasserstoffschichten bestimmt werden. Abgesehen von ihrem Nutzen für die Fusionsforschung sind die hierbei gewonnenen Elementardaten ebenso für die Modellierung gleichartiger Prozesse bei der Plasmadeposition technologisch interessanter Schichten - zum Beispiel harter amorpher Kohlenstoff- oder Diamantschichten - von Bedeutung.



Turbulente Plasmastörungen führen zu einem erhöhten Transport von Teilchen und Energie. Die hier für ASDEX Upgrade gezeigten Fluktuationen sind das Resultat einer Computersimulation.

Tokamakphysik

Der Bereich Tokamakphysik untersucht grundlegende Fragen der theoretischen Plasmaphysik und unterstützt die experimentellen Tokamak-Aktivitäten des IPP. Der Schwerpunkt liegt bei ASDEX Upgrade, zunehmend werden aber auch JET-Plasmen analysiert. Dabei kommt dem Vergleich der beiden Tokamaks eine besondere Bedeutung zu: Nur wenn die entwickelten Rechenprogramme beide - unterschiedlich großen - Tokamaks gut beschreiben, kann man ihren Vorhersagen für den nochmals größeren ITER oder gar für ein Fusionskraftwerk vertrauen. Zu den untersuchten Fragestellungen gehören die Berechnung von Plasmagleichgewichten und ihrer Stabilität gegenüber makroskopischen und mikroskopischen Störungen, die Ausbreitung und Absorption von Wellen in inhomogenen Plasmen, die Beschreibung der Plasma-Randschicht, Modellierungen zum Teilchen- und Energietransport sowie

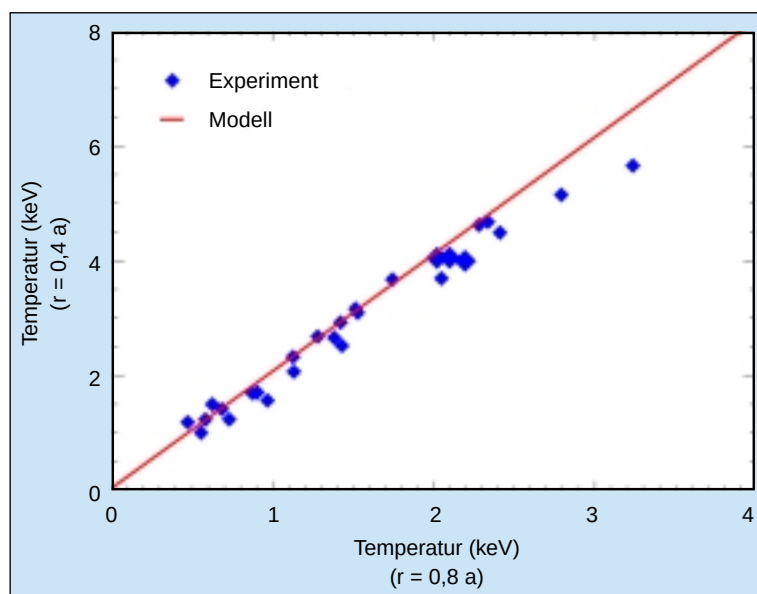
Simulationen des turbulenten Transports.

Makroskopische Plasmainstabilitäten werden meist von Druckunterschieden, aber auch von Stromstärkedifferenzen angeregt. Auch schnelle Plasmateilchen, die durch Mikrowellen- und Neutralteilchenheizung beschleunigt wurden, oder die schnellen Heliumionen in einem brennenden Plasma können solche Instabilitäten hervorrufen. Sie führen zu einem Verlust von Teilchen und Energie und schränken so den Bereich der erzielbaren Plasmawerte ein. Besonders kritisch ist dabei die Begrenzung der erreichbaren Beta-Werte, also des Plasmadrucks im Verhältnis zu dem vom Magnetfeld erzeugten Druck. Da man - um Kosten zu sparen - den zur Fusion erforderlichen Plasmadruck bei möglichst kleinem Magnetfeld erreichen will, werden insbesondere druckgetriebene Instabilitäten intensiv untersucht. Durch gemeinsame theoretische und experimentelle Arbeiten ist es gelungen, solche Instabilitäten gänzlich zu vermeiden oder bereits aufgetretene Instabilitäten aktiv zu unterdrücken.

Den Energie- und Teilchentransport in Tokamak-Plasmen hat man in den vergangenen Jahren deutlich besser verstanden. Zu Beginn der Fusionsforschung wurde angenommen, dass der Transport von Teilchen und Energie senkrecht zum Magnetfeld ausschließlich durch Stöße zwischen den Plasmateilchen hervorgerufen wird. Wäre das richtig, könnte die Zündung des Plasmas schon in einem sehr kleinen Tokamak erreicht werden. Experimente haben jedoch gezeigt, dass der tatsächliche Transport senkrecht zum Magnetfeld bis zu drei Größenordnungen größer sein kann, als durch bloße Teilchenstöße erklärt werden könnte. Intensive theoretische und experimentelle Arbeiten konnten den Grund für diesen zusätzlichen, „anormalen“ Transportmechanismus klären: Mikroskopische Instabilitäten, getrieben durch Druckdifferenzen im Plasma, führen zu turbulenten Strömungen und damit zu einem Transport von Teilchen und Energie. Das theoretische Verständnis dieses zusätzlichen Transportmechanismus ist von großer Bedeutung für die Planung künftiger Fusionsanlagen, denn bis heute ist man dabei noch auf Hochrechnungen mittels empirischer Skalierungsgesetze angewiesen, die man aus bisherigen Fusionsexperimenten gewonnen hat.

Einfache Modelle können dieses nichtlineare Phänomen allerdings nicht beschreiben; hierzu sind aufwendige numerische Simulationen nötig. Entscheidende Fortschritte konnte man daher erst in den letzten Jahren -

nach der Entwicklung schneller Hochleistungsrechner - erzielen. So gelang es beispielsweise, den grundlegenden Charakter der experimentell beobachteten Plasmafluktuationen in numerischen Simulationen zu reproduzieren (links unten). Insbesondere für die etwas kühlere und daher für Sondenmessungen zugängliche Plasmarandschicht wurden Theorie und Experiment vielfach detailliert verglichen, mit größtenteils guter qualitativer Übereinstimmung. Weiterhin wurde gezeigt, dass der numerisch berechnete turbulente Transport in der Tat groß genug ist, um die zusätzlichen Verluste in den Plasmen zu



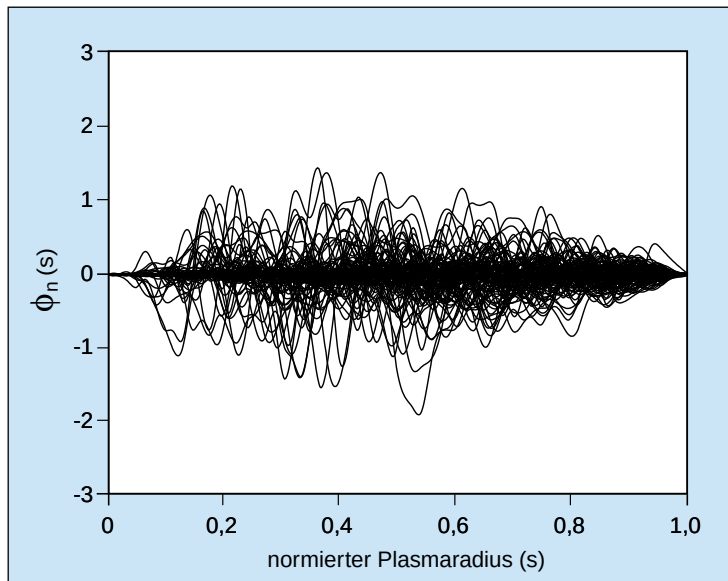
erklären. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass die Turbulenz im Plasmazentrum überwiegend von Ionen-Temperatur-Unterschieden verursacht wird. Da diese Art von Turbulenz erst beim Überschreiten eines kritischen Temperaturgradienten einsetzt, dann aber mit wachsendem Gradienten rasch zunimmt, erwartete man, dass die experimentellen Werte für den Temperaturgradienten nahe an den von der Theorie vorhergesagten kritischen Werten liegen. Diese Vermutung konnte in zahlreichen Experimenten bestätigt werden. Eine Konsequenz dieses Verhaltens ist, dass der Temperaturverlauf im Plasmazentrum wesentlich von der Temperatur am Plasmarand bestimmt wird (siehe oben).

Die Arbeiten zur Randschicht- und Divertorphysik führten zur Entwicklung eines Rechenprogramms, mit dem das Verhalten der Randschicht eines Fusionsplasmas berechnet werden kann. Das Programm wurde gemeinsam mit Wissenschaftlern aus Jülich und New York entwickelt. Für eine

Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Ionentemperaturen im Plasmazentrum und am Plasmarand.

vorgegebene Heizleistung und Geometrie der Fusionsanlage gibt es Antwort auf die Fragen: Wie groß sind die Leistungsflüsse auf die Divertorplatten? Welche Dichte und Temperatur hat das Randplasma, das auf die Divertorplatten gelenkt wird? Gelingt es, die Verunreinigungen aus dem Divertor vom Eindringen in das Hauptplasma abzuhalten? Ist die Energieabfuhr durch Verunreinigungsstrahlung hoch genug? Kann das bei der Fusion entstehende Helium genügend gut abgepumpt

werden? Um diese und andere Fragen zu beantworten, müssen sowohl das Verhalten der geladenen Plasmateilchen und der Verunreinigungen im Magnetfeld korrekt erfasst als auch die Bahnen der Neutralteilchen verfolgt werden, die aus den Plasmaionen beim Kontakt mit den Divertorplatten entstehen. Zugleich sind atomphysikalische Vorgänge wie das Ablösen von Teilchen aus den Divertorplatten oder die Aussendung von Strahlung durch die Verunreinigungen zu beschreiben.



Vollentwickelte Turbulenz in einem zylindrischen Plasma. Ursache sind von Temperaturunterschieden getriebene Instabilitäten. Der Abbildung liegt eine sogenannte Particle-in-Cell-Simulation mit etwa 100.000.000 Teilchen zugrunde. Gezeigt wird der Verlauf von etwa tausend Fourierkomponenten des fluktuierenden elektrischen Potentials über dem Plasmaradius.

Stellaratortheorie

Aufgabe des Bereichs Stellaratortheorie im IPP-Teilinstitut Greifswald ist es, kraftwerkstaugliche Magnetfelder in der toroidalen dreidimensionalen Geometrie der Stellaratoren zu finden und das Verhalten des Plasmas in ihnen zu beschreiben. Die für ein Kraftwerk notwendigen Plasmaeigenschaften werden dabei durch zwei sich ergänzende theoretische Beschreibungen erfasst: Dies ist zum einen die Magnetohydrodynamik, in deren Rahmen dreidimensionale Plasmagleichgewichte und deren Stabilität beschrieben werden. Der sie charakterisierende Beta-Wert (siehe Seite 11) muss ein ausreichend gutes Verhältnis von Plasma- zu Magnetfelddruck garantieren. Zum anderen muss die driftkinetische Beschreibung der Ionen und Elektronen zu einem guten

stoßbestimmten Einschlussverhalten des thermischen Plasmas und der ein Kraftwerksplasma heizenden Helium-Teilchen führen.

Das gegenwärtig in Greifswald entstehende Experiment WENDELSTEIN 7-X ist ein wesentlicher Schritt hin zu einem Stellarator-Kraftwerk, da es hinsichtlich dieser Eigenschaften theoretisch optimiert wurde. Bestandteil der Optimierung waren auch die das Magnetfeld erzeugenden Spulen. Im Bereich Stellaratortheorie werden diese Theorien weiter vertieft, so dass die für WENDELSTEIN 7-X vorhergesagten Eigenschaften detailliert und quantitativ beschrieben werden können. Wesentlich für den Betrieb von WENDELSTEIN 7-X sind ebenso der nicht durch die Stöße der Plasmateilchen bestimmte, sondern turbulente bzw. anomale Plasmtransport (siehe Abbildung links) und die Eigenschaften der Plasmarandschicht, in der ein Inseldivertor den Teilchen- und Energiefluss kontrollieren soll. Entsprechend beschäftigt sich die aktuelle Forschung auch mit der Entwicklung stellaratorspezifischer Theorien des turbulenten Transports und der Plasmarandschicht.

Darüber hinaus trägt der Bereich zur Fortentwicklung des Stellarator-Konzepts im allgemeinen bei. Sie verläuft bisher im wesentlichen entlang dreier Entwicklungslinien, die alle einen zu großen stoßbestimmten Transport vermeiden. Sie werden charakterisiert durch sogenannte Quasisymmetrien: erstens axiale, das heißt tokamakartige Symmetrie, zweitens helikale, das heißt lineare schraubenartige und drittens poloidale Symmetrie. Dabei bezieht sich der Symmetriebegriff nicht auf die räumliche Geometrie sondern auf die funktionale Form der Magnetfeldstärke. WENDELSTEIN 7-X gehört zum dritten Typus, der im Unterschied zu den beiden ersten nicht in reiner Form existiert. Er kann jedoch in einem verallgemeinerten Konzept, das die Konturen der sogenannten „zweiten

adiabatischen Invarianten“ betrifft, sehr gut angenähert werden.

Die Forschungen in diesen Arbeitsgebieten gehören zur Sparte der Physik mit dem Computer, der „Computational Physics“, da eine realistische Beschreibung der dreidimensionalen Stellaratorplasmen nur numerisch möglich ist. Aktuelle Forschungsthemen sind hierbei die Weiterentwicklung der Rechenverfahren für Gleichgewicht (PIES) und Spulen (NESCOIL), die Weiterentwicklung des dreidimensionalen magnetohydrodynamischen Stabilitätscodes CAS3D für leitende, das Plasma einschließende Wände, dessen kinetische Erweiterung CAS3D-K sowie die Weiterentwicklung linearer und nichtlinearer gyrokinetischer Codes, GYGLES und TORB. Hinzu kommt die Entwicklung eines dreidimensionalen Codes BoRiS für Turbulenz am Plasmarand, die Berechnung von Stellaratorkonfigurationen mit niedrigem Verhältnis von großem zu kleinem Plasmaradius sowie die Analyse von Stellaratoren vom allgemeinen Typ der poloidalen Quasisymmetrie, die möglichst perfekten stoßfreien Einschluss der Helium-Teilchen zeigen. Diese Untersuchungen werden in vielfältigen internationalen Kollaborationen und Projekten betrieben.

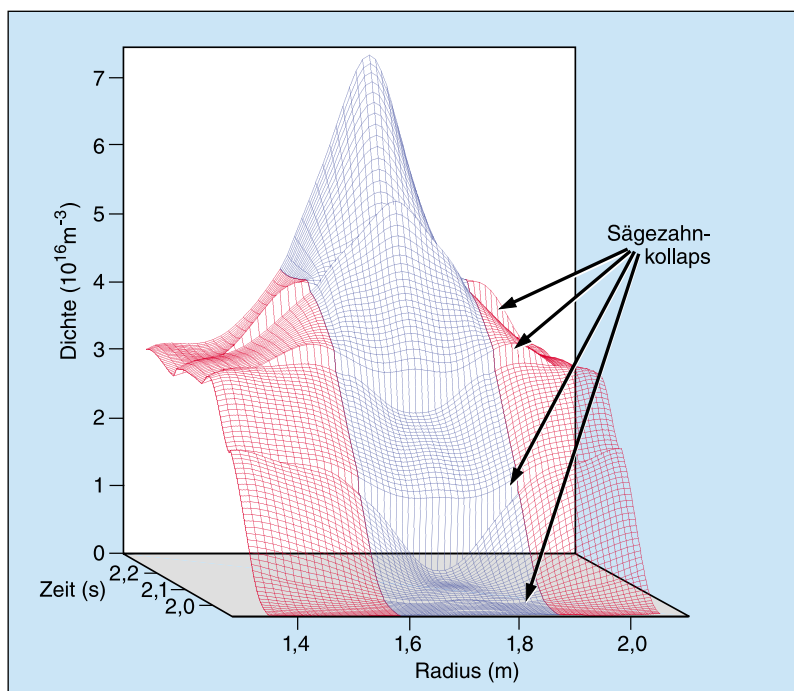
Plasmadiagnostik

Ziele des Bereichs „Experimentelle Plasmaphysik 4“ sind vor allem das Verständnis der Randschichtphysik des Plasmas, des Teilchentransports, der Energieabfuhr durch Ultraviolett- oder Röntgenstrahlung aus dem Plasma und der Verunreinigungserzeugung auf chemischem Wege. Zur Lösung dieser Fragen hat der Bereich übergreifende Diagnostikaufgaben übernommen. Hierfür wurden hauptsächlich die Spektroskopiegruppen an den Experimenten ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN 7-AS zusammengefasst, die das Plasma mit Hilfe des charakteristischen Lichts analysieren, das die Plasmateilchen aussenden.

Der Leiter des Bereichs hat gleichzeitig den Lehrstuhl für Experimentelle Plasmaphysik an der Universität Augsburg inne. Entsprechend finden die Forschungsarbeiten des Lehrstuhls zum Teil in Augsburg, zum größeren Teil in Garching statt. Gemeinsame Themen sind die Diagnostik und das Verständnis von Nichtgleichgewichtsplasmen,



1,95 Sekunden nach Entladungsbeginn wird kontinuierlich Argon in das Plasma von ASDEX Upgrade eingeblasen. Die gemessene Entwicklung der Argon-Dichte ist über der Zeit und dem Plasmaradius R aufgetragen.

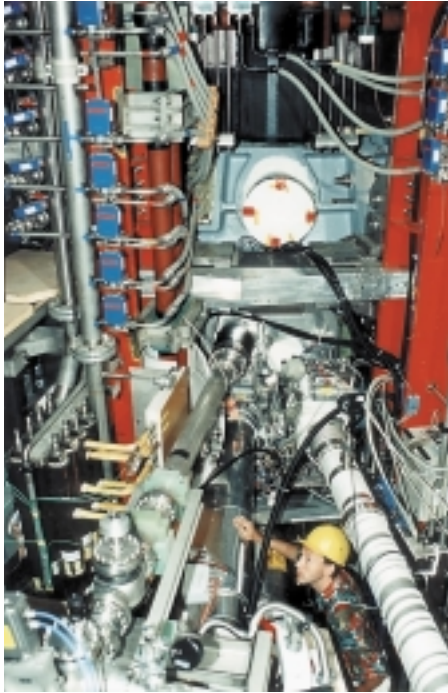


wie sie sowohl in der - vor allem in Augsburg betriebenen - Plasmatechnologie als auch in der Fusionsforschung an den Großexperimenten des IPP Verwendung finden. Auch in Augsburg werden zur Diagnostik hauptsächlich spektroskopische Methoden genutzt, die auf dem Eigenleuchten der Plasmen oder auf aktiver Anregung mit Laserlicht oder Teilchenstrahlen beruhen. Während die Messungen dort auf den sichtbaren Spektralbereich und das nahe Vakuum-Ultraviolettlicht beschränkt sind, stehen in Garching umfangreiche Diagnostiken vom Infrarot- bis zum Röntgengebiet zur Verfügung. Über das enge Forschungsgebiet des Lehrstuhls hinaus

Der zentrale Plasmabereich ist blau, der äußere rot gekennzeichnet (siehe oben). Das Plasmazentrum befindet sich bei $R_0 = 1,72$ Metern.

werden den Studenten der Universität Augsburg in Garching ebenso Arbeitsmöglichkeiten auf dem ganzen Feld der Fusionsforschung angeboten.

Foto: Ulrich Schwenn



Vakuumrohre, die an das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade angebaut sind, führen weiche Röntgenstrahlung aus dem Plasma zu verschiedenen Spektrometern.

Durch spektroskopische Messungen lässt sich eine Vielzahl von Informationen über das Plasma gewinnen: Die Messungen haben einerseits die Bestimmung der Plasmawerte zum Ziel, also der verschiedenen Teilchendichten und Temperaturen, die für eine rechnerische Modellierung der Vorgänge im Plasma unerlässlich sind. Andererseits wird die Wechselwirkung der Plasmen mit den Gefäßwänden studiert, d.h. die Ablagerung oder Abtragung von Material an der Wand. Insbesondere untersucht werden dabei chemische Vorgänge wie die Bildung von Methan, Borwasserstoff, Kohlenmonoxyd und anderen Gasen, über die man aus der Interpretation der gemessenen Molekülspektren Informationen gewinnt. Spektroskopische Messungen dienen auch dem Studium des noch weitgehend ungeklärten Teilchentransports sowie der Untersuchung lokaler Phänomene, die zu einer theoretischen Erklärung des Transports führen könnten.

Für den Einsatz der Spektroskopie müssen zunächst die Spektren als solche bekannt sein oder berechnet werden, d.h. die Atom- und Ionenlinien, die Kontinua und die Molekülbanden der entsprechenden Teilchensorten. Zur Auswertung der gemessenen Strahlungsintensitäten braucht man spezielle Anregungsmodelle, für die experimentell gemessene oder theoretisch berechnete atomphysikalische Eigenschaften bekannt sein müssen. Dazu gehören Ratenkoeffizienten für Elektronenstoßanregung, Übergangswahrscheinlichkeiten, Linienverbreiterungsmechanismen sowie Querschnitte für Ladungsaustausch und andere Stoßprozesse. Auf diesem Gebiet wird intensiv mit Atom- und Astrophysikern zusammengearbeitet. Die grundlegenden Atomdaten werden dann in sogenannten Stoß-Strahlungs-Modellen für die Analyse der gemessenen Spektren aufbereitet.

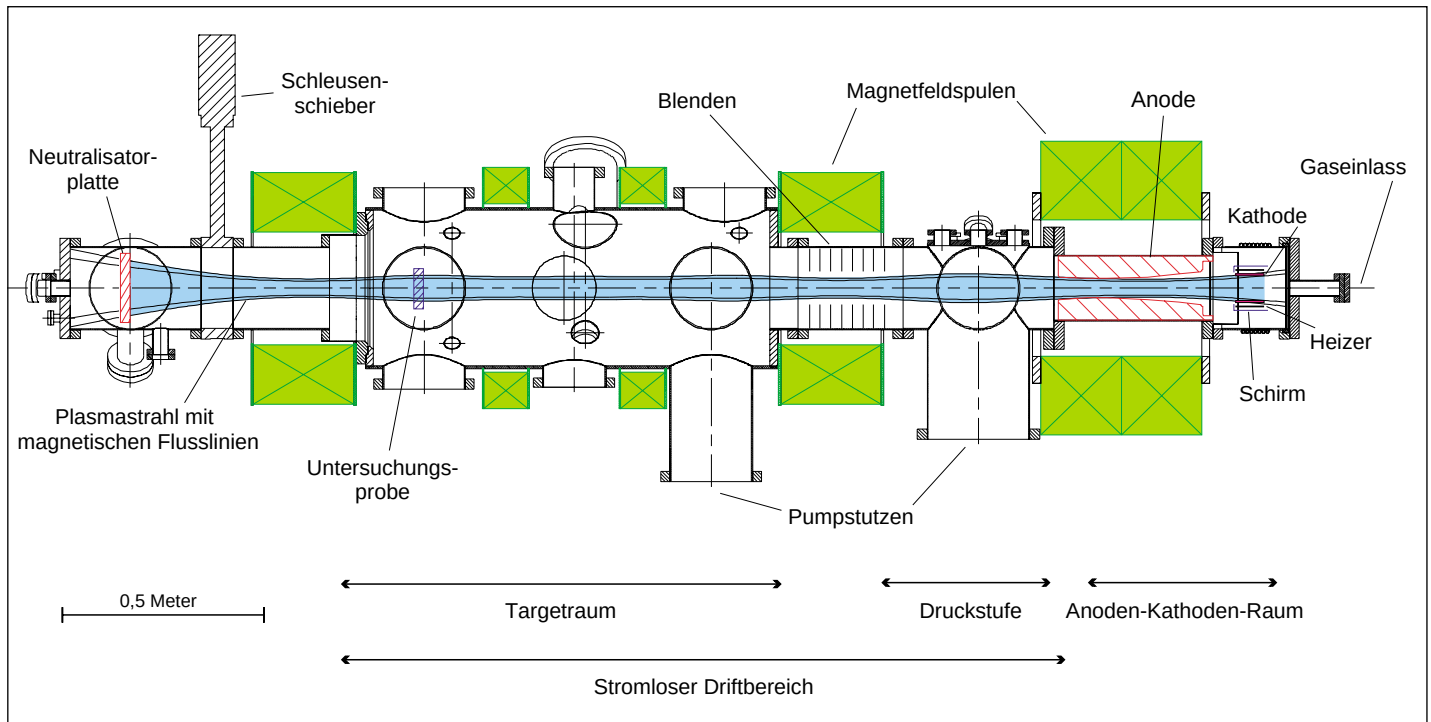
Ein Beispiel für die Aufgaben der Spektroskopie ist die Untersuchung des Verunreinigungstransports im Plasma. Von besonderem Interesse ist hier die Frage, inwieweit der Teilchentransport durch die unvermeidbaren Stöße zwischen den geladenen Ionen oder zusätzlich durch makroskopische Plasmainstabilitäten bzw. durch

mikroskopische Plasmaturbulenz verursacht wird. Der Transport durch Stöße kann unter ungünstigen Bedingungen zu einer Anhäufung von Verunreinigungen im Plasmazentrum führen. Die beiden anderen Transportprozesse hingegen arbeiten dieser Anhäufungstendenz entgegen, indem sie die sich einstellenden Dichteunterschiede wieder abbauen.

Da der stoßbestimmte Transport von der Ladungszahl der Verunreinigung abhängt, müssen die Untersuchungen für verschiedene Elemente ausgeführt werden. Dabei werden die gasförmigen Stoffe durch Ventile eingebracht. Feste Stoffe werden zunächst auf eine Glasplatte aufgetragen, von wo sie im Plasmagefäß mit einem Laserstrahl wieder abgedampft werden können. Als Beispiel zeigt die Abb. auf Seite 77 die Dichteentwicklung von Argon nach einer Injektion von einer Sekunde Dauer. Argon dringt zunächst sehr schnell zum Rand des zentralen Plasmabereichs vor, wo jedoch der weitere Transport in Richtung Zentrum sehr klein ist und schließlich von einer makroskopischen Plasmainstabilität, der sogenannten Sägezahn-Instabilität, bewerkstelligt wird. Im weiteren Verlauf erkennt man den Beginn einer sich aufbauenden Zuspitzung der Argondichte auf der Plasmaachse, die jeweils durch erneut auftretende Sägezahn-Instabilitäten periodisch abgebaut wird. Rechnungen zeigen, dass hierbei der Transport im äußeren Bereich hauptsächlich durch Turbulenz erfolgt, während der geringe Transport im Zentrum nur durch Stoßprozesse verursacht wird. Das Verständnis dieser Fragen und die damit einhergehende Entwicklung theoretischer Transportmodelle dient dazu, den Verunreinigungsgehalt in einem Fusionskraftwerk vorherzusagen.

Bereich Berlin

Nach einer Empfehlung des Wissenschaftsrates, die fusionsorientierten Arbeiten des aufgelösten Zentralinstituts für Elektronenphysik der ehemaligen Akademie der Wissenschaften der DDR weiterzuführen, gründete die Max-Planck-Gesellschaft zusammen mit dem Land Berlin 1992 den IPP-Bereich Berlin. Als „Bereich Plasmadiagnostik“ wurde er 1999 organisatorisch dem Teilinstitut Greifswald zugeordnet. Die Mitarbeiter des Bereiches arbeiten bis Ende



2003 in Berlin; anschließend wird der größte Teil nach Greifswald umziehen. Forschungsschwerpunkt des Berliner Bereichs sind Plasmaverunreinigungen, deren Diagnostik und die Physik der Plasma-Randschicht in Fusionsanlagen.

Im Gegensatz zu der im heißen Zentrum des Plasmas geltenden Hochtemperatur-Plasmaphysik, die bis in die Strukturen der Atomkerne eingreift, beschäftigt sich die Physik des kälteren Plasmarandes auch mit Vorgängen, die sich in der Atomhülle abspielen. Hier kommt es zu vielfältigen Strahlungsprozessen sowie zu Recycling- und Transportvorgängen, für die insbesondere die durch Erosion freigesetzten Verunreinigungen verantwortlich sind.

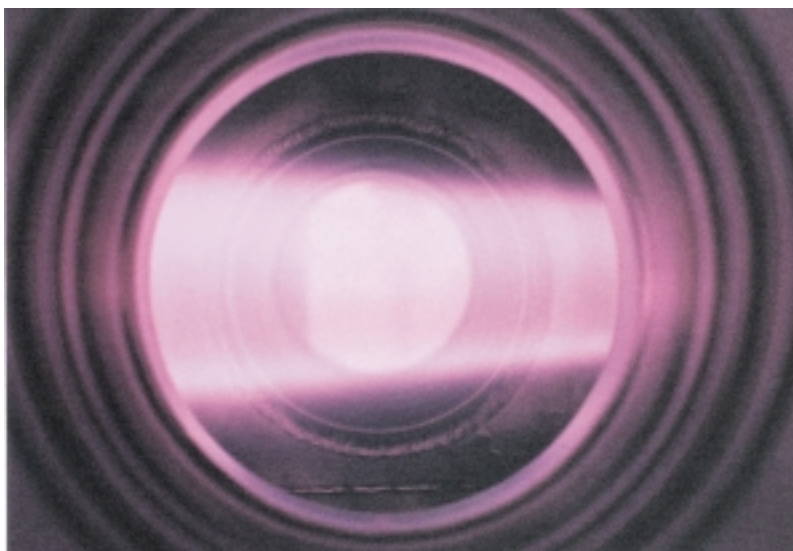
Ein Teil der Forschungskapazität des Bereichs Berlin ist direkt in die Garching Forschungsprogramme an den Experimenten ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN 7-AS eingebunden, teilweise in Zusammenarbeit mit den dort ansässigen Gruppen, teilweise mit eigenen Messapparaturen. So betreibt der Bereich an ASDEX Upgrade einen Randschichtmanipulator und ein Randschichtspektrometer. Mit dem Manipulator werden kurzzeitig Sonden in die Randschicht hineingefahren, so dass hier Temperatur und Dichte mit hoher Ortsauflösung gemessen werden können. Mit dem Randschichtspektrometer können Verunreinigungen im Plasma nachgewiesen und deren Transport- und Strahlungseigenschaften untersucht werden. Auch

die Infrarot-Thermografie - ein Verfahren, das die Wärmebelastung besonders exponierter Bauteile bestimmt - wird vom Bereich Plasma-diagnostik an WENDELSTEIN 7-AS betreut. Neben dieser Teilnahme an den Garching Projekten ist der Bereich wesentlich an der Vorbereitung des neuen Stellarators WENDELSTEIN 7-X in Greifswald beteiligt.

Darüber hinaus hat der Bereich in Berlin eigene Aktivitäten auf experimentellem und theoretischem Gebiet aufzuweisen. Hierzu gehören der Plasmagenerator PSI-2, das EBIT-Experiment (Electron Beam Ion Trap) zur Erzeugung und Untersuchung hochgeladener Ionen und das Ultrahochvakuum-Labor zur Analyse von Materialien für Fusionsanlagen. Auch theoretische Untersuchungen des Plasmas im Randbereich von Fusionsanlagen werden ausgeführt.

Der Plasmagenerator PSI-2 erzeugt stationäre Plasmen, die dem Randplasma der Fusionsanlagen ähnlich sind. Im Gegensatz zu Fusionsexperimenten, die jeweils nur für wenige Sekunden ein Plasma erzeugen, lässt sich das Plasma im Plasmagenerator unter definierten Bedingungen für viele Stunden aufrechterhalten. Dies erlaubt wichtige experimentelle Beiträge zur Physik der Plasma-Wand-Wechselwirkung; zudem wird die Anlage für die Entwicklung und Erprobung neuer Diagnostiken eingesetzt. Wegen der vergleichsweise hohen Teilchenflüsse und Temperaturen können Materialien bei hoher thermischer Belastung erprobt werden. Die

Schematische Ansicht des Plasmagenerators PSI-2. Das zylindersymmetrische Plasma erstreckt sich von der Kathode bis zur Neutralisator-Platte.



Molybdänprobe im Plasmastrahl des Plasmagenerators.

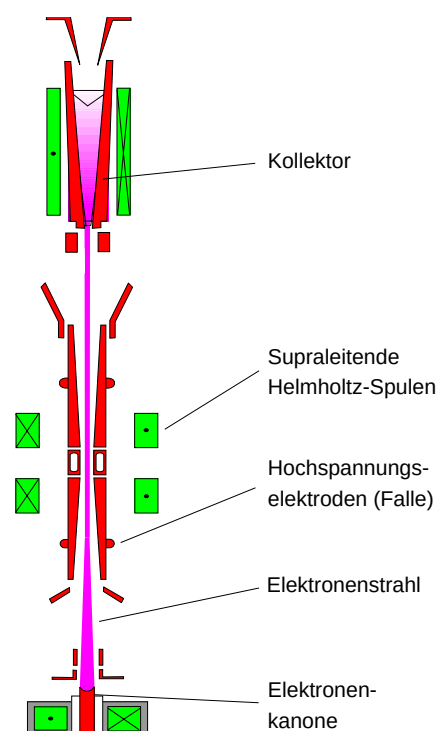
Anlage ist dabei deutlich kleiner als ein Fusionsexperiment, erfordert weniger Betriebspersonal und ist auch für die Untersuchung neuer Fragestellungen in der Grundlagenforschung geeignet.

Die Abbildung auf Seite 79 zeigt schematisch den Aufbau des Plasmagenerators PSI-2. Durch ein Ventil strömt das Arbeitsgas - zum Beispiel Wasserstoff - in den Entladungsraum, in den eine geheizte Kathode und eine ringförmige Anode ragen. Eine Hochstrom-Bogenentladung zwischen Anode und Kathode ionisiert das Arbeitsgas - es entsteht ein Plasma. Mit Hilfe von ringförmig angeordneten Magnetspulen wird ein axiales Magnetfeld einer Stärke von 0,1 bis 0,2 Tesla erzeugt. Es sorgt - ähnlich wie das Magnetfeld in Fusionsexperimenten - für den radialen Einschluss der Plasmateilchen. Hinter der Anode schließlich befindet sich ein System von Vakuumpumpen, um das durch Wandkontakt entstehende Neutralgas abzupumpen. Im sogenannten Target-Raum hat die Plasmasäule einen Durchmesser von etwa acht Zentimetern und kann für Plasma-Wand-Wechselwirkungsexperimente auf entsprechende Proben gerichtet werden.

Mit der Inbetriebnahme des Plasmagenerators wurden zunächst verschiedene diagnostische Methoden zur Bestimmung der Betriebs- und Plasmamparameter erprobt. Hierzu zählen aktive und passive spektroskopische Verfahren, elektrische Sonden und die Laserstreuung. Die Ergebnisse zeigten übereinstimmend, dass die mit dem Generator erreichbaren Plasmawerte im fusionsrelevanten Bereich liegen. Die Temperatur der Elektronen beispielsweise kann über etwa eine Größenordnung von 50.000 bis zu 350.000

Grad variiert werden. Am Plasmagenerator wurden auch neue Diagnostikverfahren für die Randschicht von Fusionsexperimenten entwickelt und erprobt. In Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Berlin wurde ein neuartiges Zwei-Photonen-Spektrometer zur Bestimmung der Wasserstoff-Isotopendichte aufgebaut und erfolgreich getestet. Diese Messungen sind für die Fusionsforschung von großer Bedeutung, da in einem brennenden Fusionsplasma die Dichten der Deuteronen und Tritonen möglichst gleich sein sollten, um eine maximale Leistungsausbeute zu erhalten. Ein anderes Verfahren, das am Plasmagenerator erprobt wurde, nutzt die Anregung und nachfolgende Emission eines neutralen Heliumstrahls, um Dichte und Temperatur des umgebenden Plasmas zu bestimmen.

Schwerpunkt der künftigen Forschung sind Plasma-Target-Experimente, mit denen der Bereich zur Suche nach alternativen Wandmaterialien für Fusionsexperimente beitragen will. Hervorzuheben sind Untersuchungen zur chemischen Erosion von unterschiedlichen kohlefaser-verstärkten Kohlenstoff-Materialien. Hier hat es sich als sehr vorteilhaft erwiesen, dass Elektronen- und Targettemperatur sowie die Auftreffenergie der Ionen weitgehend unabhängig voneinander eingestellt werden können. Weitere Schwer-



Schematische Anordnung der wesentlichen Bauteile der Ionenfalle EBIT.

punkte bilden Untersuchungen zum radialen und axialen Transport im Plasma und dessen Beeinflussung durch Fluktuationen und Plasmarotation sowie eine direkte Messung der Leistungsübertragung vom Plasma auf ein Target und deren Winkelabhängigkeit.

Mit der Ionenfalle EBIT können durch Ionisation von neutralen Atomen hochgeladene Ionen erzeugt und spektroskopisch untersucht werden. Hochgeladene Ionen kommen unter anderem in Stern- und Fusionsplasmen vor, wo wegen der hohen Temperaturen die Atome sich in ihre Bestandteile - Kerne und Elektronen - zerlegen. Für die Analyse derartiger Ionen bietet die EBIT einzigartige Möglichkeiten, da mit ihr nahezu jedes beliebige Element des Periodensystems in entsprechend hohe Ladungszustände überführt und unter definierten Bedingungen untersucht werden kann.

Die Abbildung links zeigt die schematische Anordnung der EBIT-Quelle: Ein Elektronenstrahl wird im Bereich der Hochspannungselektroden, der eigentlichen „Falle“, durch ein Magnetfeld hoher Feldstärke - drei Tesla - auf einen Durchmesser von etwa 70 Mikrometer komprimiert. Die Energie der Strahlenelektronen kann über die an den Elektroden anliegende Hochspannung von 500 bis zu 40.000 Elektronenvolt variiert werden. Der Elektronenstrahl hat mehrere Funktionen zu erfüllen: Er ionisiert die in die Falle eingebrachten Atome und schließt die so erzeugten, positiv geladenen Ionen durch anziehende Kräfte ein. Durch Stöße zwischen Elektronen und Ionen regt der Elektronenstrahl zudem Strahlungsprozesse an, die dann mit Spektrometern beobachtet werden können.

Mit der EBIT werden sowohl fusionsrelevante als auch grundlegende plasma- und atomphysikalische Fragestellungen bearbeitet. So wurden mit Blick auf den möglichen Einsatz von Krypton für die Kühlung des Randschichtplasmas in Fusionskraftwerken Energieverlust-Raten für hochgeladene Krypton-Ionen ermittelt. Hinzu kommen spektroskopische Untersuchungen an Wolfram-Ionen. Wolfram wird als Wandmaterial für Fusionsanlagen in Betracht gezogen. Bis zu 72fach ionisierte Wolfram-Ionen würden dann im Plasma als Verunreinigung vorkommen. Mit den an der EBIT gewonnenen Spektren dieser Ionen konnte zum Beispiel die Natur des zuvor in ASDEX Upgrade beobachteten Quasi-Kontinuums der Wolframstrahlung gedeutet werden. Weitere Untersuchungen an hochgeladenen Argon-Ionen dienten zur Überprüfung von

Atomdaten für die spektroskopische Temperaturdiagnostik. Schließlich wurden auch methodische Studien zur Physik der Ionenfalle und zum Einschluss der Ionen ausgeführt. Schwerpunkt der künftigen Forschung auf diesem Gebiet sollen Experimente mit extrahierten Ionen sein, die auf ein außerhalb der EBIT-Quelle befindliches Gastarget geschossen werden.

Auf dem Gebiet der Plasmatheorie beschäftigt sich der Bereich mit Modellrechnungen mit dem B2/Eirene-Code sowohl für ASDEX Upgrade zur Untersuchung des sogenannten „abgelösten“ Plasmazustandes als auch für den Plasmagenerator PSI-2. Mit einem eindimensionalen Modell für die Energie- und Teilchenbilanz sowie die Schichtbeschreibung an Kathode und Anode wurden die Elektronendichte und -temperatur des Plasmagenerators selbstkonsistent bestimmt. Mit Hilfe dieses einfachen Modells konnten die für verschiedene Arbeitsgase gemessenen Strom-Spannungskennlinien gut beschrieben werden. Theoretisch analysiert wurden weiterhin chaotische Zustände, die in einem strahlenden Randplasma auftreten können. Durch Lösungen der räumlich eindimensionalen und zeitabhängigen Wärmeleitungsgleichung können sie in Form einer periodisch getriebenen Reaktions-Diffusions-Gleichung beschrieben werden. Die künftigen Untersuchungen werden sich hauptsächlich mit Fragen befassen, die im Zusammenhang mit dem Stellarator WENDELSTEIN 7-X in Greifswald stehen.

Foto: Dieter Lange



Mit der Ionenfalle EBIT werden hochgeladene Ionen erzeugt und untersucht

Kooperationen des IPP

Mitarbeiter des Institut
für Plasmaforschung
der Universität
Stuttgart bei der
Entwicklung der
Übertragungsleitungen
für die Mikrowellen-
Heizung von
WENDELSTEIN 7-X.



Foto: Dagmar Schilling

Zusammenarbeit mit Hochschulen

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik arbeitet eng mit mehreren deutschen Universitätsinstituten zusammen. So können Erfahrung und detailliertes Fachwissen der Universitäten genutzt und Kontakt zu qualifiziertem wissenschaftlichen Nachwuchs gewonnen werden. Daneben wird es jungen IPP-Wissenschaftlern möglich, am Vorlesungsbetrieb teilzunehmen und sich zu habilitieren. Wissenschaftler des IPP unterrichten an den Universitäten in Augsburg, Düsseldorf, Ulm, Bayreuth, Bochum, Berlin, Rostock, Greifswald, Innsbruck, München, Tübingen und Stuttgart sowie an der Fachhochschule Stralsund. Umgekehrt erhalten die Hochschulinstitute durch eine finanzielle Förderung die Möglichkeit, ihre speziellen Kenntnisse am IPP anzuwenden und zu erweitern.

Das **Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart** leistet wesentliche Beiträge zur Entwicklung der Elektronen-Zyklotronresonanzheizung. Nachdem das IPF bereits die Mikrowellenheizung am Stellarator WENDELSTEIN 7-AS aufgebaut hatte, liefert es nun die wesentlichen Strahlführungskomponenten der Mikrowellenheizung für WENDELSTEIN 7-X, deren Gesamtaufbau

im Rahmen der „Entwicklungsgemeinschaft Kernfusion“ das Forschungszentrum Karlsruhe übernommen hat. Eine ähnlich enge Zusammenarbeit mit dem IPF hat sich auch am Tokamak ASDEX Upgrade entwickelt. Die Mikrowellen-Heizung wurde hier von 1994 bis 1998 installiert und wird seit 2000 weiter ausgebaut, wobei das IPF die Übertragungsleitungen dimensioniert und sich an den Experimenten beteiligt. Des weiteren laufen an ASDEX Upgrade Arbeiten zur Diagnostik der Plasmarandschicht, insbesondere mittels hochauflösender Spektroskopie und zur Mikrowellendiagnostik. Hinzu kommen Experimente zur magnetohydrodynamischen Stabilisierung.

Eine enge Kooperation verbindet das IPP mit dem **Forschungsschwerpunkt Oberflächenphysik der Universität Bayreuth**: Zwei der Lehrstuhlinhaber in Bayreuth sind zugleich Mitglieder der Wissenschaftlichen Leitung des IPP. Untersucht wird vor allem die Wechselwirkung von Wasserstoff und Deuterium mit den Wandmaterialien von Fusionsanlagen. Dabei soll die physikalische Wechselwirkung von langsamen Wasserstoffatomen mit Kohlenstoff, Bor und Beryllium sowie insbesondere die chemische Zerstäubung von Kohlenstoff-Materialien durch Wasserstoff- und Deuteriumatome aufgeklärt werden. Ergänzend zu den Arbeiten im IPP-Bereich Oberflächenphysik untersucht man in Bayreuth vorwiegend die grundsätzlichen Mechanismen dieser Prozesse.

Mit der **Technischen Universität München** kooperiert das IPP auf mehreren Gebieten: Seit August 1999 besteht ein Rahmenvertrag mit dem **Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik** über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Oberflächenphysik. Thema ist die Mehrwellenlängen-Speckle-Interferometrie für Oberflächenanalysen aus größerem Abstand von einigen Metern. Das Verfahren ist besonders für direkte Erosionsmessungen an Divertorplatten und Gefäßstrukturen der Fusionsexperimente geeignet, weil die optische Methode - anders als mechanische Verfahren - die Messdaten zerstörungsfrei und schnell gewinnt.

Im Juni 2001 wurde mit dem **Physik-Department E16** und dem **Zentrum für Interdisziplinäre Wissenschaftliche Zusammenarbeit mit Zentral- und Osteuropa** der

Technischen Universität München ein Rahmenvertrag über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Materialwissenschaften abgeschlossen. Die Arbeiten über „Niedertemperaturplasmen für die Oberflächenmodifizierung und Schichtherstellung“ werden von den IPP-Bereichen Technologie und Oberflächenphysik koordiniert.

Der **Lehrstuhl für Feststoff- und Grenzflächenverfahrenstechnik** der Technischen Universität München untersucht zusammen mit dem IPP-Bereich Materialforschung Plasmabelastungen von Materialien für zukünftige Plasmagefäßstrukturen und -wände.

Am Lehrstuhl **E15 des Physik-Departments** der Technischen Universität München werden seit 1999 Wandmaterialproben von JET und ASDEX Upgrade im Tandembeschleuniger analysiert. Mittels einer hochempfindlichen Nachweismethode für Spurenelemente werden die Tiefenprofile von eingelagerten Wasserstoffisotopen gemessen.

Mit dem **Zentrum für Mathematik** der Technischen Universität München wurden gemeinsame Forschungsarbeiten zur mathematischen Modellierung von Hochfrequenzröhren, sogenannten Gyrotrons, vereinbart.

Der Leiter des Lehrstuhls für **Experimentelle Plasmaphysik an der Universität Augsburg** wurde 1994 in einem gemeinsamen Verfahren der Max-Planck-Gesellschaft und der Universität Augsburg sowohl als Wissenschaftliches Mitglied an das IPP als auch auf den Lehrstuhl an die Universität Augsburg berufen. Die Zusammenarbeit betrifft vor allem die Physik der Plasmarandschicht und die Plasmaspektroskopie, also die Analyse der Fusionsplasmen mit Hilfe des charakteristischen Lichts, das die Plasmateilchen aussenden. Weiterhin erstellt der Lehrstuhl gemeinsam mit dem Büro für Energie- und Systemstudien des IPP Studien zur zukünftigen Energieversorgung.

In einem Kooperationsvertrag zwischen dem IPP und der **Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald** auf dem Gebiet der fusionsorientierten Plasmaphysik wurde die gemeinsame Berufung von drei Professoren auf C4-Lehrstühle der Universität Greifswald und als Wissenschaftliche Mitglieder des IPP vereinbart. Ihre Lehraufgaben erfüllen die Lehrstuhlinhaber im Fachbereich Physik der Universität, ihre Forschungsaufgaben im IPP-Teilinstitut Greifswald.

Im Mai 2000 wurde in Greifswald die **International Max Planck Research School „Bounded Plasmas“** gegründet. Das internationale Forschungs- und Lehrzentrum für

Plasmatechnologie und Fusionsforschung wurde von der **Ernst-Moritz-Arndt-Universität** und dem IPP-Teilinstitut Greifswald gemeinsam aufgebaut. Einbezogen sind auch das **Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik in Greifswald** und die **Universität Rostock**. Der interdisziplinäre Forschungsansatz der International Research School, die seit dem Wintersemester 2000 läuft, umfasst sowohl die Plasmaphysik und Fusionsforschung als auch die Grenzflächenforschung und Computer-Physik.

In einem Rahmenvertrag zwischen der Max-Planck-Gesellschaft und dem Land Berlin wurde 1996 an der **Humboldt-Universität in Berlin** die Einrichtung eines Schwerpunktes Plasmaphysik vereinbart. Der Leiter des Berliner IPP-Bereichs Plasmadiagnostik wurde in einem gemeinsamen Berufungsverfahren als Wissenschaftliches Mitglied des IPP und als Professor für Plasmaphysik an die Humboldt-Universität berufen. Seine Lehrverpflichtungen nimmt er im Fachbereich Experimentalphysik wahr.

In Zusammenarbeit mit dem IPP untersucht das **Institut für Experimentelle und Angewandte Physik der Universität Kiel** Plasmaturbulenzen an der Torsatron-Anlage TJ-K, eine Leihgabe des spanischen Fusionsforschungsinstituts CIEMAT. Zudem werden in Kiel Daten des IPP-Stellarators WENDELSTEIN 7-AS zur Untersuchung interner Transportbarrieren ausgewertet und gemeinsame Workshops organisiert.

Mit der **Technischen Fachhochschule Wildau** arbeitet das IPP auf dem Gebiet der Plasmadiagnostik zusammen: Entwickelt wird ein thermischer Heliumstrahl zur Bestimmung der Elektronendichte und -temperatur sowie eine aktive Laserdiagnostik. Hinzu kommen materialkundliche und metallografische Untersuchungen.

Die Zusammenarbeit mit der **Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Rostock** verfolgt zwei Ziele: Im Auftrag des IPP erstellen die Rostocker Ingenieure eine Machbarkeitsstudie zur Energieversorgung in Europa bis 2100 unter Einbeziehung neuer Energiequellen wie Kernfusion, Brennstoffzellen, Wind- und Sonnenenergie. Außerdem untersuchen sie die mögliche Rückwirkung des Betriebs von WENDELSTEIN 7-X auf das vorgelagerte Energieversorgungsnetz.

Über diese vertraglich geregelten Zusammenarbeiten hinaus pflegt das IPP zahlreiche wissenschaftliche Kontakte mit vielen anderen deutschen Universitäten.



Internationale Zusammenarbeit

Foto: Ulrich Schwenn

Das IPP arbeitet nicht nur mit vielen deutschen Hochschulen, sondern auch mit zahlreichen europäischen und außereuropäischen Instituten zusammen. Die europäische Kooperation geschieht im Rahmen von Assoziationsverträgen mit der Europäischen Atomgemeinschaft Euratom.

Gemeinsam betreiben die europäischen Assoziationen in Culham/Großbritannien das europäische Fusionsexperiment **JET** (Joint European Torus). Dies geschieht seit dem Jahr 2000 in einer neuen Organisationsform im Rahmen des **European Fusion Development Agreement (EFDA)**; seither ist JET kein selbständiges Gemeinschaftsprojekt der Europäischen Fusionslaboratorien mehr. Das Vorbereiten, Ausführen und Auswerten der Experimente übernehmen nun zeitweise von den Assoziationen abgeordnete Wissenschaftler und Techniker. Für den technischen Betrieb ist das britische Fusionslabor in Culham zuständig, das die Forschungsanlage samt der zugehörigen Messgeräte und Plasmaheizung betriebsbereit zur Verfügung stellt. So kann das leistungsfähige JET-Experiment über das vorgesehene Betriebsende im Jahr 1999 hinaus zur Vorbereitung von ITER genutzt werden. Das IPP, das bereits vor der Organisationsänderung durch Entwicklung, Bau und Betrieb verschiedener Plasmadiagnostiken sowie die Entsendung von wissenschaftlich-technischem Personal maßgeblich an JET beteiligt war, ist auch nach dem Jahr 2000 ein Hauptteilnehmer des JET-Programms. Zahlreiche IPP-Physiker haben seither zu Experimenten an JET beigetragen, die alle wichtigen plasmaphysikalischen Themen abdecken. Da JET vor allem der ITER-Vorbereitung dienen soll, ist der experimentelle Vergleich mit dem Garching ASDEX Upgrade - neben JET der einzige ITER-ähnliche Tokamak in Europa - besonders fruchtbar.

Unter der Schirmherrschaft der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) in Wien wurden 1988 gemeinsame Arbeiten der vier Fusionsprogramme in Europa, den Vereinigten Staaten von Amerika, Japan und der Sowjetunion für einen Internationalen Experimentalreaktor **ITER** vereinbart (siehe Seite 52). Von 1988 bis 1990 arbeitete die europäisch-japanisch-amerikanisch-russische ITER-Studiengruppe im IPP in Garching als Gastlabor am Entwurf des Testreaktors. In der anschließenden detaillierten Planungsphase von Juli 1992 bis Juli 1998 war das gemeinsame Team an drei Fusionszentren beschäftigt: in San Diego in den USA als Integrationszentrum, Naka in Japan und Garching als europäischer Standort. Mit dem im Juni 1998 vorgelegten Abschlussbericht lagen erstmals detaillierte Baupläne für einen experimentellen Fusionsreaktor vor - das gebündelte physikalische und technologische Wissen der weltweiten Fusionsforschung. Obwohl damit aus wissenschaftlich-technischer Sicht aller Beteiligten eine ausreichende Grundlage für den Bau der Anlage vorlag und die Kosten von 13 Milliarden Mark im zuvor genehmigten Finanzrahmen blieben, konnte man dennoch - angesichts der Finanzschwierigkeiten in den Partnerländern - nicht zu einer Bauentscheidung kommen. 1998 zogen sich die USA - zumindest vorübergehend - aus dem Projekt zurück, beteiligten sich aber noch bis Mitte 1999 an den ITER-Technologieprojekten. Die verbleibenden Partner beschlossen, den ITER-Entwurf kostensparend zu überarbeiten. Die Planungsphase wurde daher um drei Jahre verlängert und zugleich mit Vorverhandlungen für den gemeinsamen Bau von ITER begonnen. Im Juli 2001 wurden die Pläne für ITER-FEAT (Fusion Energy Amplifier Tokamak) vorgelegt. Ungefähr zehn Jahre nach der Baugenehmigung könnte ITER das erste Plasma erzeugen.

Neben dieser Kooperation bei Großprojekten hat das IPP eine Reihe von bilateralen Zusam-



menarbeitsverträgen abgeschlossen:

In der 1982 von **IPP** und **Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)** gegründeten „Entwicklungsgemeinschaft Kernfusion“, der 2000 auch das **Forschungszentrum Jülich (FZJ)** beigetreten ist, werden die Forschungsprogramme der Institute aufeinander abgestimmt und arbeitsteilig Plasmaphysik (IPP, FZJ) und Fusionstechnologie (FZK) untersucht. Die drei Institute sind zudem im „Programm Kernfusion“ der Helmholtz-Gemeinschaft organisiert.

Ein gemeinsam betriebenes „**Centre for Interdisciplinary Plasma Science**“ (CIPS) hat das IPP mit dem Garching **Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik** im Jahr 2000 gegründet. Ziel des zunächst auf fünf Jahre befristeten Zusammenschlusses ist es, die in verschiedenen Arbeitsgruppen vorhandenen Kenntnisse, Techniken und Laborausrüstungen zu bündeln. Rund 40 Mitarbeiter aus den beiden benachbarten Instituten stimmen ihre Arbeit auf den Gebieten „Komplexe Plasmen“, „Theoretische Plasmaphysik“ und „Komplexe Systeme“ miteinander ab.

Mit dem **Commissariat à l’Energie Atomique (CEA) in Grenoble und Saclay** ist der Test der Magnetspulen von WENDELSTEIN 7-X vereinbart. Das Institut der CEA in **Cadarache** entwickelt gemeinsam mit dem IPP Komponenten für einen Neutralteilchen-Injektor mit negativen Ionen für ITER. Untersuchungen zum Stromtrieb mit Elektronen-Zyklotronwellen sowie die damit erreichbare Kontrolle von magnetohydrodynamischen Instabilitäten umfasst ein Zusammenarbeitungsvertrag mit dem **Culham Laboratory in Abingdon**, Großbritannien. Gemeinsam mit dem **Centre de Recherches en Physique des Plasmas in Lausanne** werden Computerprogramme zur Berechnung von Plasmagleichgewichten entwickelt. Das **University College Cork in Irland** beteiligt sich an der Entwicklung der Feedback-Steuerung und Plasmadiagnostik für ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN 7-AS. Das IPP leistet technische Unterstützung für die Installation des Stellarators TJ-II am **Centro de Investigación Energetica Medio-Ambiental Tecnológica (CIEMAT) in Madrid**. Außerdem hat CIEMAT dem IPP das Torsatron TJ-K als Leihgabe überlassen, das an der Universität Kiel für plasmaphysikalische Untersuchungen sowie zur Nachwuchsausbildung verwendet wird. Der Zusammenarbeitungsvertrag mit dem **Kernforschungszentrum Democritos in Griechen-**

land sieht den Bau eines Langmuir-Sondensystems für ASDEX Upgrade vor. Mit dem portugiesischen **Instituto Superior Técnico (IST) in Lissabon** ist die Lieferung und der Einbau eines reflektometrischen Diagnostiksystems für ASDEX Upgrade vereinbart sowie die Entwicklung eines Datenerfassungssystems für WENDELSTEIN 7-X. Die Kooperation mit der **Königlich-Technischen Hochschule Stockholm** in Schweden sieht die Entwicklung einer Neutronendiagnostik für WENDELSTEIN 7-X vor. Plasmaturbulenzen in Stellaratoren sind Gegenstand eines Vertrags mit dem **Institut Risø in Roskilde**, Dänemark. Die



University of Technology Helsinki und das **Technical Research Center of Finland** stellen Berechnungen zum Ionentransport in ASDEX Upgrade an. Der Kooperationsvertrag mit dem **Instituto di Fisica del Plasma, Mailand**, sieht die Entwicklung von physikalischen Modellen für den transienten Teilchentransport vor. Dabei werden Daten der Experimente ASDEX Upgrade und RTP vergleichend analysiert. Das **Consorzio di Ricerca per l’Energia e le Applicazioni Tecnologiche dell’Elettromagnetismo in Reggio Calabria** beteiligt sich an der Entwicklung eines neuronalen Netzwerks zur Dateninterpretation an ASDEX Upgrade. Thema des Zusammenarbeitungsvertrages mit dem **National Institute for Laser and Radiation Physics, Bukarest**, ist die Interpretation und die Kontrolle von helikalen Störungen in Tokamaks. Das **Institut für Theoretische Physik an der Technischen Universität Graz** leistet Beiträge zur kinetischen Theorie der Heizung und des Transports in toroidalen Magnetfeldern. Mit dem **Max-Planck-Institut für Quantenoptik** in Garching sind seit 1986 Grundlagenuntersuchungen von Plasmen hoher Dichte vereinbart. Eine ähnliche Vereinbarung be-

steht seit 1999 mit der **Gesellschaft für Schwerionenforschung** in Darmstadt.

Mit dem **Institut für Angewandte Physik (IAP) in Nizhny Novgorod, Russland**, besteht eine enge Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Elektronenzyklotron-Resonanzheizung, in die auch das **Kurchatov-Institut in Moskau** einbezogen ist. Die vom IAP gebauten Hochfrequenzröhren werden an den Experimenten ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN 7-AS zur Plasmaheizung und zum Stromtrieb eingesetzt. Weitere gemeinsame Studienarbeiten betreffen die kinetische Stabilitätsanalyse von Verteilungsfunktionen. Das Kurchatov-Institut beteiligt sich an der Theorieentwicklung für optimierte Stellaratoren. Das **Joffe-Institut in St. Petersburg** baut Neutralteilchen-Analysatoren für ASDEX Upgrade und die WENDELSTEIN-Stellaratoren. Mit der **Technischen Staats-Universität St. Petersburg** wurden gemeinsame Arbeiten zur Weiterentwicklung des B2-Codes und numerische Modellierungen der Pelletinjektion vereinbart. Das **Physikalisch-Technische Institut in Charkow, Ukraine**, untersucht neutrale Alkali-Strahlen für ASDEX Upgrade.

Den Rahmen für die meisten Kooperationen mit den Instituten in Russland und der Ukraine liefert das bilaterale Abkommen zur wissenschaftlich-Technischen-Zusammenarbeit.

Intensiven wissenschaftlichen Austausch unterstützt eine Vereinbarung zur Zusammenarbeit mit den **USA** und **Süd-Korea** bei der Erforschung von Tokamaks mit poloidalem Divertor hauptsächlich in den Experimenten

ASDEX Upgrade, Doublet III-D (San Diego), ALCATOR-CMOD (MIT) und KSTAR (Süd-Korea), die unter der Schirmherrschaft der Internationalen Energie-Agentur (IEA) in Paris geschlossen wurde. Ebenso besteht eine Vereinbarung mit den **USA, Japan, Australien, Russland** und der **Ukraine** auf dem Gebiet der Stellarator-Entwicklung. Im Rahmen der sozio-ökonomischen IPP-Studien zur Fusion erstellt das **Institute for Management** in **Ahmedabad, Indien**, ein Langzeit-Energieszenario für Indien unter Einbeziehung der Fusion.

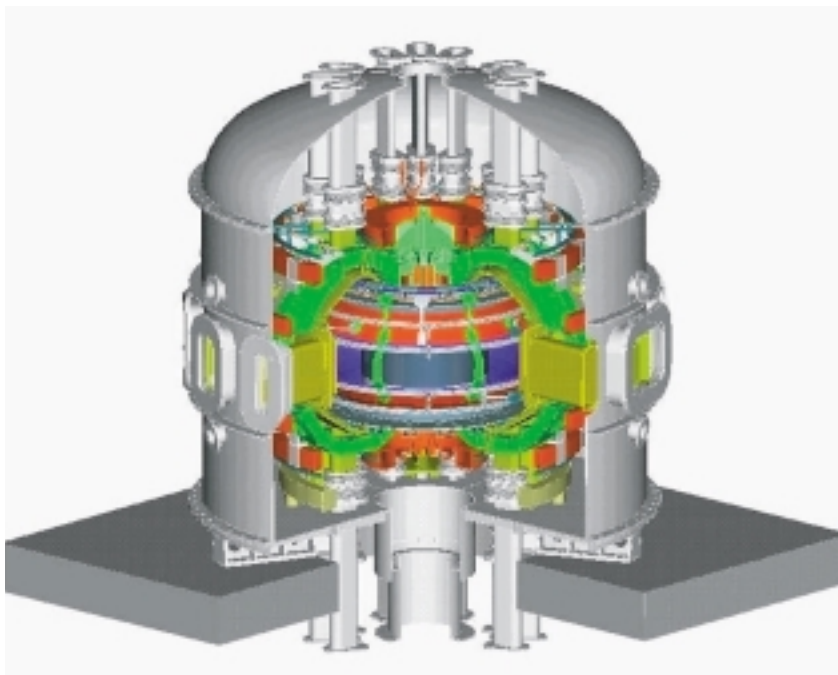
Zusammenarbeit mit der Industrie

Der Bau eines künftigen Fusionskraftwerks kann nur gemeinsam mit der Industrie verwirklicht werden. Deshalb ist es erforderlich, bei Konstruktion und Betrieb der Fusionsexperimente Industriebetriebe im Rahmen der öffentlichen Auftragsvergabe so einzubinden, dass ihnen die Erarbeitung des besonderen, über den derzeitigen Stand der Technik hinausgehenden Know-hows ermöglicht wird. Ein effizienter Weg, die im IPP gewonnenen Kenntnisse in die industrielle Anwendung zu übertragen, ist nach bisherigen Erfahrungen die Vergabe von Studien-, Entwicklungs- und Fertigungsaufträgen, zum Beispiel von Prototypen.

Das Auftragsvolumen des IPP in Garching und Greifswald liegt in der Größenordnung von derzeit 50 Millionen Euro pro Jahr für Investitionen. Dies betrifft vor allem die Gebiete der Magnetfeldtechnik, Kryotechnik, Vakuumtechnik, Hoch- und Höchstfrequenztechnik, Heizsysteme, Mess- und Steuerungstechnik, Hochtemperatur- und Hochlastwerkstoffe sowie Datenverarbeitung. Der wechselseitige Informationsaustausch während der Auftragsabwicklung geht über den konkreten Vertragsgegenstand meist weit hinaus und gibt befruchtende Impulse für die weitere Zusammenarbeit.

Das IPP findet seine Vertragspartner unter Berücksichtigung der öffentlichen Vergaberichtlinien in Firmen jeder Größe. Aufträge, deren Ausführung eine aufwändige Infrastruktur voraussetzen - wie hochbelastete große Stahlstrukturen, hochgenaue Stromversorgungen, Hochfrequenzsender oder Lasersysteme - gehen meist an größere Firmen. Bei

Der geplante supraleitende Tokamak KSTAR, Süd-Korea.



Grafik: KBSI

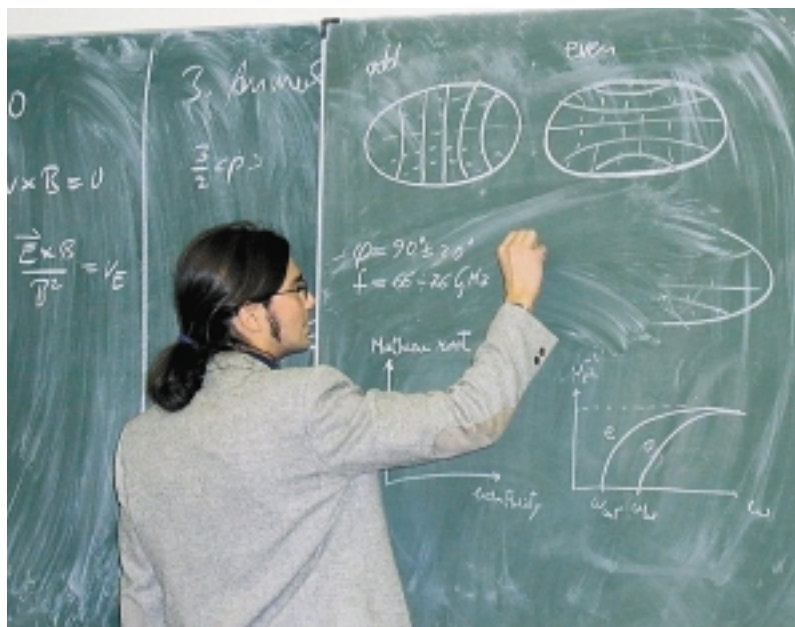
Aufträgen aus dem Gebiet der Elektronik, Datenerfassung und kleinerer Spezialgeräte sind dagegen oftmals flexible kleine und mittlere Unternehmen im Vorteil. Hier verbleiben die Aufträge häufig in der Region, während große Komponenten eher bei internationalen Unternehmen beschafft werden.

Nachwuchsförderung

Das IPP fördert den qualifizierten wissenschaftlichen Nachwuchs angefangen mit Werkstudentenplätzen und Praktika für Studierende nach dem Vordiplom über die Vergabe und Betreuung von Diplom- und Doktorarbeiten bis hin zum Angebot eines umfassenden Graduiertenstudiums mit Seminaren, Kolloquien und Studienaufenthalten im Ausland sowie der Unterstützung bei der Habilitation.

Die Diplomanden und Doktoranden beteiligen sich im IPP an interdisziplinärer Teamarbeit und werden in Kooperationen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene einbezogen. Sie arbeiten in verschiedenen Forschungsbereichen mit; innerhalb jeder Gruppe werden sie von einem Mentor betreut, der auch Kontakte zu auswärtigen Instituten vermittelt. Intensive Betreuung und zeitliche Straffung der Diplom- oder Doktorarbeit gehen damit einher. Neben regelmäßigen Seminaren und Kolloquien wird die Teilnahme an nationalen und internationalen Tagungen gefördert. Hinzu kommt die jährliche, 1986 ins Leben gerufene europäische „Summer University for Plasma Physics“. Am Teilinstitut Greifswald wurde 2000 die „International Max Planck Research School Bounded Plasmas“ eingerichtet, die in Zusammenarbeit des IPP mit der Universität Greifswald ein integriertes Promotionsstudium mit zusätzlichen Vorlesungen und Seminaren anbietet.

Die Doktorandenstellen im IPP haben eine maximale Laufzeit von drei Jahren und werden in Höhe einer halben BAT 2a-Stelle vergütet. Zusätzlich kann dies ab 2001 durch eine Zulage auf eine Zweidrittel-BAT 2a-Stelle erhöht werden. Die durchschnittliche Promotionsdauer beträgt zur Zeit etwa 40 Monate. Das IPP beschäftigt derzeit 48 Doktoranden bei einem Frauenanteil von etwa 20 Prozent.



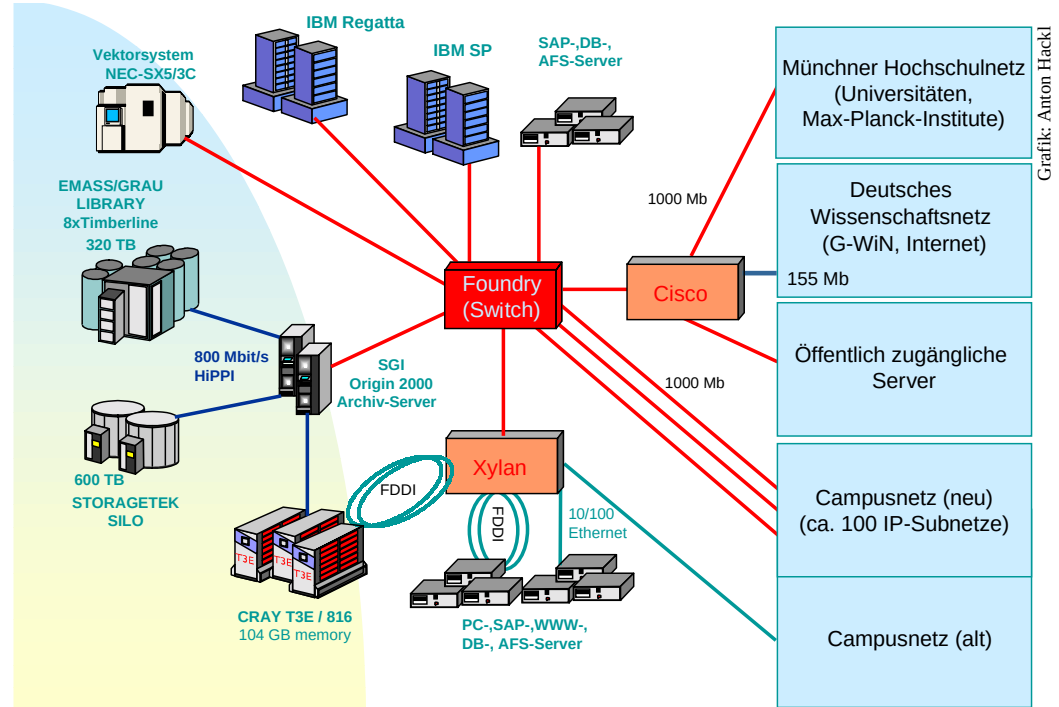
Oben: International Max Planck Research School „Bounded Plasmas“ in Greifswald
Links: Teilnehmer der „Summer University for Plasma Physics 2001“ im IPP in Garching.

Die Kooperation mit Universitäten hat sich auf nun 14 Partneruniversitäten ausgeweitet, von denen etwa ein Drittel außerhalb Deutschlands liegen. Mit etwa zwölf abgeschlossenen Promotionen pro Jahr bildet das IPP knapp ein Prozent aller bundesdeutschen Graduierten in Physik aus.

Nach der Promotion bietet das Institut dem qualifizierten wissenschaftlichen Nachwuchs an, als Postdoktorand für drei Jahre am Forschungsprogramm des IPP mitzuarbeiten. Insgesamt wurde die Zahl der Postdoc-Positionen in den letzten Jahren auf etwa 50 nahezu verdoppelt. Bei der Besetzung von Dauerstellen haben IPP-Postdocs wegen ihrer speziellen Erfahrungen günstige Chancen.

Wissenschaftliche Infrastruktur

Rechner- und Netzkonfiguration des Rechenzentrums Garching



Grafik: Anton Hackl

Das Rechenzentrum Garching

Das Rechenzentrum Garching ist eine gemeinsame Einrichtung der Max-Planck-Gesellschaft und des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik mit Sitz in Garching. Während die theoretischen Gruppen der Max-Planck-Gesellschaft vor allem an den hier installierten Hochleistungsrechnern interessiert sind, werden die größeren Experimente der Garchinger Max-Planck-Institute mit ihrem hohen Datenaufkommen vor allem durch die Bereitstellung von Archivspeichern versorgt. Diese Anforderungen spiegeln sich in der Konfiguration des Rechenzentrums wider, das seit Jahrzehnten automatische Bandroboter und Supercomputer betreibt. Für die effiziente Nutzung der Supercomputer wird komplexe Anwendungsunterstützung angeboten.

Neben dem 1996 installierten Hochleistungsparallelrechner Cray T3E mit 816 Prozessoren nach dem Endausbau 1998 wird ein schneller Vektorrechner NEC SX-5 mit drei Prozessoren betrieben. In Nachfolge des

Cray T3E-Systems begann Ende 2001 die Installation eines IBM-Rechensystems, das bis Ende 2002 auf das neue Hochleistungssystem mit einer Peakleistung von 3,8 Teraflops pro Sekunde und 1,8 TeraByte Hauptspeicher aufgerüstet werden wird.

Das Archivsystem besteht aus Robotersystemen der Firmen STK und Grau/Adig. Die Gesamtkapazität der Systeme liegt bei rund einem PetaByte. Neben der Datenarchivierung für die Großexperimente WENDELSTEIN 7-AS und ASDEX Upgrade im IPP werden Satellitendaten des Max-Planck-Instituts für Extraterrestrische Physik gespeichert, Supercomputer-Simulationsdaten sowie Daten von weiteren bundesweit verteilten Max-Planck-Instituten.

Bei der Vernetzung der Computersysteme des Rechenzentrums dominiert die Netzwerktechnik Gigabit-Ethernet. Damit ist der Datenaustausch mit einer theoretischen Geschwindigkeit von etwa 125 Millionen Zeichen - zum Beispiel Buchstaben - pro Sekunde möglich. Mit dieser Technik werden im zentralen Bereich alle Hochleistungsrechner, also AFS-, ADSM-, NT- und Internet-Server, verbunden, um mit maximaler Ge-

schwindigkeit von allen Benutzern erreichbar zu sein. Als aktive Koppellemente kommen sogenannte „Switches“ zum Einsatz, die die Daten blockierungsfrei vermitteln. Damit sich die verschiedenen Betriebssysteme - Unix, WindowsNT, u.s.w. - untereinander verstehen und die Daten richtig interpretieren können, werden Kommunikationsprotokolle als eine Art „Computer-Esperanto“ eingesetzt. Im Rechenzentrum und im IPP handelt es sich dabei fast ausschließlich um die Protokollfamilie TCP/IP, die auch im Internet verwendet wird.

Für die Forschungsabteilungen des IPP mit ihrer Vielzahl von Personal Computern, Workstations und Netzwerkgeräten ist eine Netzstruktur mit Einteilung in kleinere selbstständige Einheiten eingerichtet, sogenannte Subnetze, die auf die unterschiedlichen Anforderungen abgestimmt sind. Basis ist ein Kabelnetz, das jedes Endgerät direkt mit der passenden Netzwerktechnik über ein Glasfaser- oder Kupferkabel an einen Switch anschließt. Diese Bereichs-Switches sind mittels Glasfaser und Gigabit-Ethernet mit dem

zentralen Switch im Rechenzentrum verbunden und bilden so ein Hochgeschwindigkeitsrückgrat. Die externe Anbindung des Instituts zur Kommunikation mit anderen Max-Planck-Instituten und internationalen Partnern geschieht über das Internet mit dem Deutschen Wissenschaftsnetz DFN als Provider. Die Anschlussgeschwindigkeit über einen Cisco-Router liegt bei 155 Megabits pro Sekunde.

Die Datenverarbeitungsgruppe des Rechenzentrums Garching unterstützt die Großexperimente des IPP bei der Datenerfassung, -archivierung und -verarbeitung. Zur Zeit entwickelt sie das Datenerfassungssystem für den Stellarator WENDELSTEIN 7-X, der im Teilinstitut Greifswald aufgebaut wird. Das System muss die gesamte Menge der am Experiment von den Plasmadiagnostiken gewonnenen Daten aufnehmen und archivieren. Angesichts der in WENDELSTEIN 7-X geplanten Plasmaentladungen von rund 30 Minuten Dauer ist die erzeugte Datenmenge sehr groß, so dass neuartige Verfahren für die Datenerfassung entwickelt werden müssen.

Zentrale Technische Einrichtungen

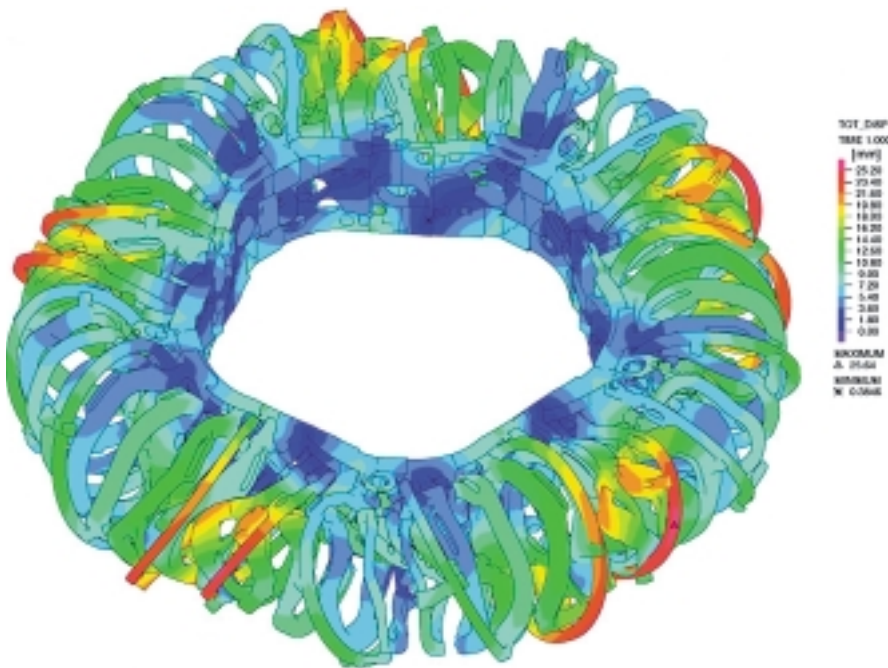
Zur Unterstützung der wissenschaftlichen Bereiche beim Entwurf, Aufbau und Betrieb der Experimente und ihrer zahlreichen Diagnostiken sind in den Zentralen Technischen Einrichtungen (ZTE) an den beiden Standorten Garching und Greifswald etwa 190 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zusammengefasst. Sie erbringen technische Dienstleistungen von der Entwicklung über die betriebliche Versorgung bis zur handwerklichen Ausführung. Hinzu kommen rund 30 Auszubildende in den gewerblichen Fachrichtungen Feinmechanik und Energieelektronik. Die Fachkräfte der ZTE konzentrieren sich auf Aufgaben, die von der Industrie nicht in der für die Forschung benötigten Weise erbracht werden können, sei es, weil die Wege zu lang, die Verständigung zu aufwändig oder die Termine zu kurzfristig sind. Dabei wird versucht, die Arbeit zwischen den Gruppen am Experiment, den ZTE und der Industrie optimal aufzuteilen. Alle von den Projekten und wissenschaftlichen Bereichen bei den ZTE in Auftrag gegebenen Leistungen werden abgerechnet.

In den „**Technischen Diensten Greifswald**“ sind zur Zeit etwa 50 Mitarbeiterinnen



und Mitarbeiter beschäftigt. Die Abteilung ist aus der Gruppe Standortentwicklung hervorgegangen, die im Jahr 2000 mit der Übergabe der Institutsgebäude an das IPP in die ZTE eingegliedert wurde. Die Technischen Dienste mit den Abteilungen Maschinenbau, Elektrotechnik, Elektronik und Haustechnik sind personell noch im Aufbau begriffen. Dabei sind die Betreuung der Liegenschaft und die Stromversorgung bereits vollständig

Hochspannungsschaltfeld der Gleichstromanlage für die Zusatzheizung in Greifswald, konstruiert im IPP.



**Verformungsrechnung
für die Magnetspulen
von WENDELSTEIN 7-X,
berechnet in den
Konstruktionsbüros
der ZTE.**

arbeitsfähig; die umfangreiche Versorgung mit Hochspannungsgleichstrom wird gerade aufgebaut. Auch die Ausbildung mit jährlich drei Feinmechanikern hat begonnen. Die Werkstätten sind inzwischen technisch komplett ausgerüstet; Laboratorien für Vakuumtechnik, Kunststofftechnik und Reinigung sind im Aufbau. Für die Experimente WEGA und VINETA, die vor allem der Physiker- ausbildung und der plasmaphysikalischen Grundlagenforschung dienen, wurden vielfältige Arbeiten von der Montage über die Stromversorgung und Kühlung bis zur Diagnostikausrüstung ausgeführt. Ebenso wurden erste Arbeiten für WENDELSTEIN 7-X ausgeführt oder bei der Industrie betreut. Die Vorbereitungen für die Montage der Module von WENDELSTEIN 7-X haben begonnen.

Die **Zentralen Technischen Einrichtungen in Garching** bestehen aus sechs Abteilungen: Zwei sorgen für den Betrieb der Liegenschaft und die Stromversorgung der Experimente, drei Abteilungen befassen sich mit Entwicklungsaufgaben; in der größten Abteilung werden elektrische und mechanische Geräte und Bauteile gefertigt.

In der Abteilung „Konstruktion und Berechnung“ arbeiten zur Zeit zehn Konstrukteure, drei Berechnungsingenieure und drei Ingenieure für die Betreuung der CAD-Hard- und Software. Das Programm CADD5 dient dem interaktiven dreidimensionalen CAD-Entwurf und ist eine Voraussetzung zum Beispiel für die Konstruktion von Stellarator- experimenten. Zur Berechnung thermomechanisch hochbelasteter Baugruppen werden die Programme PATRAN, ADINA, ANSYS und MARC benutzt. Die Abteilung arbeitet derzeit überwiegend für den Stellarator

WENDELSTEIN 7-X, außerdem für ASDEX Upgrade, die Ionen- und Elektronen-Zyklotronheizung sowie ITER. Wegen der zur Zeit großen Nachfrage nach Konstruktionsleistungen sind externe Ingenieurbüros in die Arbeiten eingebunden. Schwerpunkte der Berechnungen sind Belastungen der Stützstruktur und des Plasmagefäßes von WENDELSTEIN 7-X. Für ITER werden Gefäßabstützung und thermische Belastung von Divertor und erster Wand im Detail untersucht.

Die Abteilung „Elektronikentwicklung“ mit den Gruppen Mess-, Steuer- und Regeltechnik sowie Leistungselektronik und Hochspannungstechnik erarbeitet Lösungen für die Großexperimente WENDELSTEIN 7-AS, WENDELSTEIN 7-X und ASDEX Upgrade. Durch die langjährige Erfahrung und die laufenden Kontakte zu den Mitarbeitern an den Experimenten können die Aufgaben mit interdisziplinärem Sachverstand bearbeitet werden. Zu den Aufgaben der Gruppe Mess-, Steuer- und Regeltechnik gehört die analoge und digitale Signalverarbeitung und Regeltechnik, Messverstärker, komplexe programmierbare Logik sowie die meist hardwarenahe Softwareentwicklung in Assembler, C, LabView und Pascal. Die Gruppe Leistungselektronik betreut und entwickelt Hochspannungsmodulatoren als Schalt-, Schutz- und Regeleinrichtungen für die Plasmazusatzheizungen. Dazu sind Kenntnisse auf den Gebieten der Leistungselektronik, Elektronenröhren, der optoelektronischen Signalwandlung, der Steuerungstechnik sowie der analogen und digitalen Regelungstechnik vorhanden.



**Die Lehrwerkstatt im IPP-Teilinstitut
Greifswald.**

den. Die Abteilung betreut und berät die Experimentgruppen zudem im Bereich Hochspannungstechnik und Hochspannungsmesstechnik und entwickelt bzw. testet schnelle Schutzeinrichtungen und Leistungsverstärker. Bei den hohen Schaltleistungen im Megawattbereich mit steilen Anstiegsflanken ist es dabei eine besondere Herausforderung für die Entwickler, die gewünschte Funktion zu erfüllen und die elektromagnetische Verträglichkeit zu garantieren.

Die Abteilung „Materialtechnologie“ bietet Dienste auf den Gebieten funktionelle Oberflächen, Chemie und Oberflächenanalytik sowie Vakuumtechnik an. Zu ersteren gehören neben der Galvanotechnik mit Reinigung für vakuumtechnische Zwecke auch die physikalische und chemische Beschichtung. Auftraggeber sind die experimentellen Gruppen für Diagnostik, Plasmagefäß-Auskleidung und Plasmaheizung mit ihren Hochfrequenz-Anwendungen. Die Substratfertigung mit den unterschiedlichsten Materialien für Laser-Blow-Off-Experimente und die Belegung von Graphitziegeln mit Metallen für die Plasmagefäßwand sind wichtige technologische Angebote an die Experimente. Hierzu dient auch ein umfangreiches Instrumentarium an spektroskopischen Analysegeräten. Ein Schwerpunkt der Vakuumtechnik sind ultrahochvakuumgerechte Fügearbeiten zum Beispiel mit Mikroplasmaschweißen oder Schutzgaslötung sowie die Ausgasung von Materialien. Ferner werden ein Vakuumpumpenservice und Leckprüfungen angeboten. Letzteres ist auch Teil der Qualitätssicherung in der mechanischen Fertigung. Zur Abteilung gehört außerdem die Kunststofftechnik; zudem ist sie an der Sondermüllentsorgung des IPP beteiligt.

Ein Großteil der ZTE-Mitarbeiter arbeitet in der Abteilung „Mechanische und elektrische Fertigung“. Hierzu gehören drei mechanische Werkstätten, eine Schreinerei, eine Elektro- und eine Elektronikwerkstatt, die Arbeitsvorbereitung, die Lager und die gewerbliche Ausbildung mit derzeit sechs Ausbildungsplätzen pro Jahr für Energieelektroniker. Die Werkstätten übernehmen vorzugsweise solche Aufgaben, die engen Kontakt mit den Experimentatoren voraussetzen und die laufenden Arbeiten flexibel und unkompliziert unterstützen. Die Arbeitsvorbereitung koordiniert komplexe mechanische Fertigungsaufträge und bezieht dabei Gewerbe und Industrie mit ein. Die Werkstätten sind mit einer breiten Palette von Maschinen und Geräten vorzugsweise für Einzelteil-

fertigung ausgestattet, unter anderem mit einer numerisch gesteuerten Messmaschine, einer Hochdruck-Wasserstrahlschneidanlage sowie mit EDV-vernetzten Maschinen für die Anfertigung von Platinen und Frästeilen.

Die „Betriebliche Versorgung“ fasst alle ingenieurtechnischen und handwerklichen Leistungen für Planung, Betrieb und Unterhalt der technischen Gebäudeausrüstung zusammen: allgemeine Stromversorgung auf Mittel- und Niederspannungsebene, Kühlwasser, Heizung und Lüftung, Trinkwasser, Aufzüge, Krane und Gebäudeautomation sowie die Dokumentation aller Sparten mit einem geographischen Dokumentations-



Montage der Hochspannungsdurchführung für die Gleichstromversorgung im IPP-Teilinstitut Greifswald.

system. Die Abteilung besteht aus vier Ingenieuren und zwei Werkstätten für Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärtechnik bzw. Elektrotechnik. Zu ihren Aufgaben gehört auch die Energiewirtschaft für Wärme und Strom mit Abrechnung der Verbraucher. In die Wartung teilen sich die Werkstätten und Fachfirmen.

Die Abteilung „Experimentelle Stromversorgung“ ist speziell für die Stromversorgung der Experimente zuständig und besteht aus drei Gruppen. Die Generator-Gruppe kümmert sich um drei Schwungradgeneratoren mit einer Gesamtleistung von 531 Megawatt und einer verfügbaren Energie von 2,6 Gigajoule. Die pulsformige Energie wird an die Gleichrichter-Gruppe mit Stromrichter-

**Elektronikwerkstatt:
Unter dem Mikroskop
wird ein SMD-Bauteil
(Surface mounted
device) auf eine
Platine gelötet.**



anlagen von insgesamt 485 Megawatt zur Versorgung der Magnetspulen der Experimente und an die Gruppe Hochspannungsgleichstromanlagen zur Versorgung der verschiedenen Plasma-Heizsysteme weitergeleitet. Eine Blindstromkompensation bis zu 120 Megawatt für einen der Generatoren erhöht die verfügbare Wirkleistung. Studien zur Parallelschaltung von zwei Generatoren sollen prüfen, unter welchen Umständen der experimentelle Leistungs- und Energiebedarf optimiert werden kann. Alle Erweiterungen dienen der mittelfristigen Sicherung des wissenschaftlichen Programms von ASDEX Upgrade.

Bibliothek

Bücher, die aus dem Bestand von Max von Laue übernommen wurden, bildeten den Grundstock der IPP-Bibliothek. In Garching umfasst die Bibliothek heute rund 100.000 Monographien und Berichte sowie knapp 400 Zeitschriftenabonnements. Davon sind etwa 40.000 Bände in der Zentralbibliothek als Präsenzbestand aufgestellt, abgeschlossene ältere Zeitschriftenjahrgänge werden in einem Magazin aufbewahrt. Entlehbare Doppel-

exemplare sowie bereichsspezifische Literatur stehen in fünf Bereichsbibliotheken zur Verfügung. Im IPP-Teilinstitut Greifswald befindet sich die Bibliothek noch im Aufbau mit zur Zeit rund 5000 Monographien und 50 laufenden Zeitschriften.

Der Bestand ist durch das Bibliothekssystem LIBERO erschlossen, der Katalog über World Wide Web abrufbar. Auf der Webseite der Bibliothek im Internet unter der Adresse www.ipp.mpg.de/de/kontakt/bibliothek.html sind die jeweils aktuellen

Datenbanken, Online-Zeitschriften und sonstige Informationsquellen aufgelistet.

Neben dem Kauf neuer Literatur zu Physik, Mathematik und Informatik ist die Beschaffung weiterer Informationen weltweit Schwerpunkt der Bibliotheksarbeit. In den verschiedenen Online-Katalogen wird nach benötigten Unterlagen gesucht, um sie den Wissenschaftlern im IPP möglichst schnell zur Verfügung zu stellen. Die enge Zusammenarbeit mit anderen Max-Planck-Instituten sowie den Bibliotheksvertretern der Helmholtz-Gemeinschaft führt zu einem ständigen Erfahrungsaustausch über die neuesten Entwicklungen im Bibliothekswesen, wie zum Beispiel den Stand der Verhandlungen mit Verlagen zum Online-Volltext-Zugriff von Zeitschriften oder eines gemeinsamen Zeitschriftenverzeichnisses der Max-Planck-Gesellschaft.

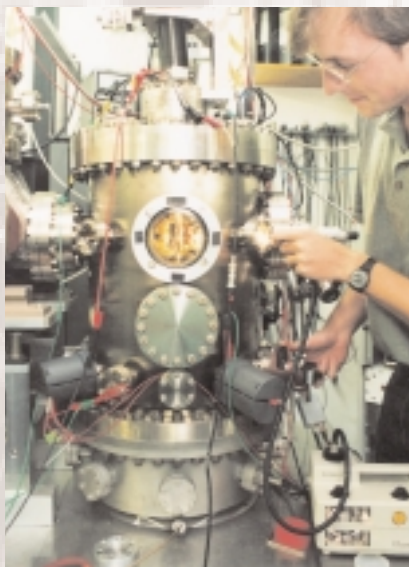
Die Bibliothek übernimmt zudem die formale Abwicklung der Veröffentlichungen des Instituts. So werden Manuskripte an die gewünschten Zeitschriften weitergeleitet, benötigte Sonderdrucke bestellt und an Forschungseinrichtungen in aller Welt verschickt. In einer Reprint-Datenbank werden die Veröffentlichungen erfasst und bei der Zusammenstellung der Literaturlisten für den IPP-Jahresbericht und das Jahrbuch der Max-Planck-Gesellschaft genutzt.



Die IPP-Bibliothek in Garching

Anhang

.....



Verwaltung und Allgemeine Dienste

Personalabteilung

Zum Jahreswechsel 2001/2002 beschäftigte das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik 1066 Mitarbeiter. Das Planstellen-Soll betrug 916,77 Stellen einschließlich 16 Annex-Stellen, die dem Institut zur Unterstützung seiner internationalen Verpflichtungen außerhalb des Stellenplans genehmigt wurden.

Ein Wissenschaftler wurde zum EFDA-Team abgeordnet; 13 Mitarbeiter wurden zur zusätzlichen Unterstützung des Teams beschäftigt. Vier Mitarbeiter unterstützten das ITER-Team sowie 19 Zusatzkräfte, die außerhalb des Stellenplans beschäftigt waren.

2001 betrug das Durchschnittsalter der wissenschaftlichen Mitarbeiter auf Planstellen 47,46 Jahre. Bezieht man die außerhalb des Stellenplanes mit Dreijahresverträgen angestellten Nachwuchs-Wissenschaftler mit ein, so ergibt sich ein Durchschnittsalter von 45,38 Jahren. →

Rechts- und Patentabteilung

Die Rechts- und Patentabteilung betreut die Gremien und Organe des Instituts und entwirft und verhandelt Verträge, zum Beispiel Kooperationsverträge mit deutschen und europäischen Universitäten und Forschungseinrichtungen. Des weiteren verwaltet sie die gewerblichen Schutzrechte des IPP und untersucht sie auf ihre Verwertbarkeit. In den letzten zehn Jahren wurden insgesamt etwa 1000 in- und ausländische Patente betreut. Die Schutzrechte und das Know-how werden in Zusammenarbeit mit der zur Max-Planck-Gesellschaft gehörenden Firma Garching Innovation GmbH verwertet. Seit 1990 bestanden jährlich etwa zehn Lizenzverträge über Schutzrechte und technisches Know-how des IPP.

Bauabteilung

Die Bauabteilung ist für die Planung und Ausführung aller Neu- und Umbauten, für Erweiterungsmaßnahmen und den Bauunterhalt im IPP sowie seinem Greifswalder Teilinstitut verantwortlich. Zudem wird der Bauunterhalt der Nachbarinstitute in Garching - Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Max-Planck-Institut für Astrophysik und European Southern Observatory - sowie des IPP-Bereichs in Berlin betreut.

Finanzabteilung

Im Jahre 2001 stand ein Haushaltsvolumen von 145,2 Millionen Euro zur Verfügung. Die Ausgaben setzten sich verglichen mit den Vorjahren wie folgt zusammen: ←

Einnahmen-Ausgaben- rechnung für die Jahre 1999 bis 2001

	Ist 1999 Mio Euro	Ist 2000 Mio Euro	Ist 2001 Mio Euro
Personalausgaben	48,4	48,5	49,8
Sachausgaben	21,9	23,4	32,6
Beteiligung am JET-Projekt	1,9	2,2	2,4
durchlaufende Mittel für fremde Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	0,6	0,8	0,8
Betriebsausgaben	72,8	74,9	85,6
laufende Investitionen	16,2	16,5	19,9
Investitionen nach Ausbauprogramm	51,8	42,5	39,8
Investitionsausgaben	68,0	59,0	59,7
Gesamtausgaben	140,8	133,9	145,3
Die Finanzierung wurde wie folgt vorgenommen:			
Eigene Erträge	16,2	17,4	16,6
EURATOM-Zuschüsse für IPP	26,1	20,1	41,0
EURATOM-Zuschüsse für fremde Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	0,6	0,8	0,8
Zuschuss Bund	74,6	78,6	73,6
Zuschuss Bayern	4,7	4,3	4,3
Zuschuss Berlin	0,4	0,4	0,4
Zuschuss Mecklenburg- Vorpommern	18,2	12,3	8,5
Gesamteinnahmen	140,8	133,9	145,2

Wissenschaftler	
einschl. Gastforscher	285
Technisches Personal	480
Direktorium und Betriebsrat	41
Allgemeine Dienste	21
Verwaltung	78
Summe	905

Auszubildende und Praktikanten	41
Doktoranden und Diplomanden, Werkstudenten	69
Zeithilfen	19
Zusatzpersonal EFDA/ITER	32
Summe sonstiges Personal	161

Gesamtpersonal 1066

Personalstand zum Jahreswechsel 01/2002

Beschaffungsabteilung

Die Beschaffungsabteilung vergibt im Jahr etwa 10.000 Aufträge mit einem Gesamtauftragswert von rund 50 Millionen Euro.

Sozialabteilung

Die Sozialabteilung des IPP ist für die Institutswohnungen, die Reinigung, das Versicherungswesen, die Kantine, die Postorganisation, Familienheimdarlehen sowie für die Fahrbereitschaft zuständig.

Stabsstellen der Geschäftsführung

Organisation

Neben allgemeinen Organisationsaufgaben ist in der Abteilung die Datenverarbeitungsorganisation der Verwaltung angesiedelt. Darunter fällt die hard- und softwaremäßige Betreuung der rund 100 Personal Computer innerhalb der Verwaltung sowie die Weiterentwicklung der eingesetzten SAP-Module und die Betreuung der rund 120 SAP-Benutzer. Seit dem Jahr 2000 ist SAP R/3 mit den Modulen FI, FI-AA, FI-TV, CO und MM im Einsatz.

Revision

Neben routinemäßigen Prüfungen stellte die Innenrevision verschiedene Ordnungsmäßigkeits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an, die alle ohne schwerwiegende Beanstandungen blieben.

Controlling

Die Abteilung Controlling beschäftigt sich mit der Einführung eines Budgetierungssystems und richtet darauf aufbauend eine unabhängige Soll-Ist-Überwachung der Projektkosten ein.

Wissenschaftlich-Technisches Büro

Das Wissenschaftlich-Technische Büro als Stabsabteilung des Wissenschaftlichen Direktors umfasst neben Abteilungen der zentralen wissenschaftlichen Infrastruktur wie Sicherheit, Öffentlichkeitsarbeit und Bibliothek (siehe Seite 92) auch eine Arbeitsgruppe, die sich mit allgemeinen Fragen der Energieversorgung und Energieforschung beschäftigt.

Wesentliche Aufgaben sind zudem die Projektplanung und -kontrolle sowie die Vorbereitung der Sitzungen von Wissenschaftlicher Leitung und Direktorium. Auch für die Pflege der Kontakte mit nationalen und europäischen Entscheidungsträgern - unter anderem durch ein Verbindungsbüro in Brüssel - ist die Abteilung zuständig.

Forschungsplanung und Projektüberwachung

In jährlichen Programmbesprechungen erläutern die Projekte und Arbeitsgruppen den Stand und die Ergebnisse ihrer Arbeiten und stellen die weitere Planung vor. Auf dieser Grundlage werden der jährliche Personaleinsatz und Mittelaufwand ermittelt sowie die mittelfristige Institutsplanung erarbeitet, die mit Euratom sowie den Fusionsforschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft abgestimmt werden.

Büro für Energie- und Systemstudien

Das Büro für Energie- und Systemstudien analysiert die langfristige Entwicklung von Energiesystemen und deren Auswirkungen auf Mensch, Gesellschaft und Umwelt. Dabei ist die Untersuchung der Kernfusion, die eine der Säulen der zukünftigen Energieversorgung werden könnte, von besonderer Bedeutung (siehe Seite 34). Die Arbeiten sind in nationale und internationale Kooperationen eingebettet; eine enge Zusammenarbeit besteht insbesondere mit der Universität Augsburg.

Sicherheit

Die Abteilung „Zentrale Sicherheit“ übernimmt für die drei Institutsteile in Garching, Greifswald und Berlin die Fürsorge- und Koordinierungsaufgaben bezüglich Arbeitssicherheit, Strahlenschutz, Laserschutz, Gefahrstoffumgang und Sondermüllentsorgung, Gefahrguttransport, Brandschutz und Objektsicherung. Sie ist damit für alle Sicherheitsangelegenheiten zuständig, die zentral wahrgenommen werden müssen und nicht an die in den Institutsbereichen für Sicherheit und Strahlenschutz zuständigen Personen delegiert werden können.

Darüber hinaus unterstützt die Abteilung die nach dem Gesetz verantwortlichen Vorgesetzten und Strahlenschutzbeauftragten bei ihren Aufgaben und nimmt bei der administrativen und technischen Betreuung der wissenschaftlichen Bereiche sicherheitsorganisatorische Aufgaben wahr.

Die 1994 gegründete Betriebsorganisation „Sicherheit und Umweltschutz“ des IPP nimmt entsprechend einer gesetzlichen Vorgabe Umweltschutzaufgaben wahr. Dazu gehören die Sondermüllentsorgung, Gefahrguttransporte sowie der Schutz von Luft und Gewässern. Diese Aufgaben sind auf die Abteilung „Zentrale Sicherheit“ (Sondermüllentsorgung und Gefahrguttransporte) und die „Zentralen Technischen Einrichtungen“ (Immissions- und Gewässerschutz) aufgeteilt.

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Ein für die Gesellschaft bedeutsames Thema wie die Gestaltungsmöglichkeiten für die künftige Energieversorgung sollte Gegenstand öffentlicher Diskussion sein. Die Abteilung Presse- und Öffentlichkeitsarbeit informiert daher kontinuierlich über Aufgaben und Ziele der Fusionsforschung sowie über die Arbeiten im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik an den drei Standorten Garching, Greifswald und Berlin. Dazu gehört zum einen der stete Kontakt zu Presse, Funk und Fernsehen. Zum anderen bietet die Abteilung unterschiedliche Informationschriften zur Fusionsforschung an, einen Newsletter zur Energieforschung, einen Info- und Frageservice im Internet, Institutsführungen für Schüler, Studenten und die allgemeine Öffentlichkeit, Vorträge vor unterschiedlichsten Auditorien, Tage der offenen Tür, Ausstellungen, Messepräsentationen und weitere Veranstaltungen, in denen der Kontakt und Meinungsaustausch mit der Öffentlichkeit gesucht wird.

Die Journalistenbetreuung geschieht durch Auskünfte, die Vermittlung von Hintergrundgesprächen, Pressekonferenzen, Interviews

Der Newsletter „Energie-Perspektiven“ richtet sich an alle am Thema „Energie“ Interessierte.



und Informationstexte. Mit etwa einer Pressemitteilung monatlich informiert die Abteilung über aktuelle Themen und Entwicklungen, was sich in den Jahren 2000 und 2001 in einem Presseecho von jeweils rund 450 Artikeln über Kernfusion niederschlug mit einer Gesamtauflage der berichtenden Zeitungen und Zeitschriften von 10 bis 20 Millionen.

Zur Unterstützung fundierter Berichterstattung bietet das einwöchige „IPP-Praktikum für Wissenschaftsjournalisten“ Journalisten die Gelegenheit, die Forschungspraxis „von innen“ kennenzulernen. Das Praktikum fand erstmals 1995 statt und wird seither jährlich angeboten.

Schnell verfügbare Informationen, einen Frageservice sowie weiterführende Links zu den Fusionslaboratorien in aller Welt bieten unter der Adresse www.ipp.mpg.de die Internetseiten des IPP. Architektur und grafischer Auftritt wurden 2001 neu konzipiert und der Inhalt stark erweitert.

Um die Bedeutung der Energieforschung im Allgemeinen zu unterstreichen und die Fusion in energiewirtschaftlichen Kontext zu stellen, gibt die Abteilung den Newsletter „Energieperspektiven - Forschung für die Energieversorgung von morgen“ heraus. Das Informationsblatt, das 2002 im dritten Jahrgang erscheint, richtet sich an alle am Thema „Energie“ Interessierte und soll auf knappe und allgemeinverständliche Weise über aktuelle Entwicklungen berichten und Hintergrundinformationen bereitstellen. Neben der Druckfassung erscheint der Newsletter ebenso im Internet unter der Adresse www.energie-perspektiven.de, wo weiterführende Artikel zu den gedruckten Kurzbeiträgen zu finden sind.

Für die interne Kommunikation sorgen die Hauszeitschrift „Impulse“, die Mitarbeiterbroschüre „Wer, Was, Wo“ sowie das Intranet.

Unter den von der Abteilung organisierten Veranstaltungen ragte im Jahr 2000 die mehrfache Beteiligung des IPP an der Weltausstellung EXPO 2000 heraus: Zum einen präsentierte sich das Institut von Juni bis Oktober auf dem EXPO-Gelände in Hannover im Themenpark mit seinen thematisch orientierten Einzelausstellungen. In zwei dieser Ausstellungen - „Wissen“ und „Energie“ - war das IPP vertreten. Zum Thema Energie wurde gemeinsam mit dem schweizerischen Fusionslaboratorium CRPP eine dreidimensionale Computeranimation geboten - ein virtueller Flug durch den geplanten Testreaktor ITER. Wie eine Fusionsanlage



Der Themenpark auf dem EXPO-Gelände in Hannover. In der Ausstellung zum Thema „Energie“ war das IPP mit einem Originalteil der Fusionsanlage ASDEX Upgrade vertreten.

im Original aussieht, veranschaulichte den Besuchern ein Plasmagefäß-Teil von ASDEX Upgrade. Zum Thema „Wissen“ beteiligte sich das IPP an dem „Wissenschaftstunnel“ der Max-Planck-Gesellschaft: Ein bunter Reigen von Bildern und Filmen aus den Max-Planck-Instituten auf eine 170 Meter lange Tunnelwand projiziert, erläuterte die Themenvielfalt in der Max-Planck-Gesellschaft. Ein paar Schritte weiter traf man im „Global House“ erneut auf das IPP: Als eines von 25 „Weltweiten Projekten“ der EXPO 2000, die aus den mehr als 280 in ganz Deutschland verteilten Präsentationen ausgewählt wurden, präsentiert sich hier das Projekt „Vision Fusion“ des IPP-Teilinstituts Greifswald.

Mit dem Projekt „Vision Fusion“ bestritt das IPP eines der insgesamt zehn weltweiten EXPO-Projekte in Mecklenburg-Vorpommern. Der Kultusminister des Landes, Professor Kauffold, sowie der Greifswalder Oberbürgermeister von der Wense eröffneten das Projekt am 5. Juni: Unter dem Motto „Ein Forschungsinstitut entsteht - schauen Sie zu“ erwartete die Besucher im IPP-Teilinstitut Greifswald eine Ausstellung zur Fusionsforschung - eine erweiterte Fassung der europäischen Wanderausstellung „Fusion Expo“ - mit Schautafeln, Videos, Originalteilen und Experimenten sowie Führungen durch Technikhallen und Werkstätten. Dazu gehörte auch ein Modell von WENDELSTEIN 7-X in Originalgröße mit vollen 15 Meter Durchmesser, das mit Unterstützung der Auszubildenden des BiG-Bildungs-



„Erforscht die Welt der Wellen“, ein Physikprojekt für Kinder, hier im IPP-Teilinstitut Greifswald

zentrums in Greifswald in der Experimentierhalle aufgebaut worden war. Insgesamt haben während der Weltausstellung mehr als 8000 Personen - bis zu zehn Besuchergruppen pro Tag - das Angebot genutzt. Zu Gästen aus der Region kamen in den Sommermonaten Urlauber aus ganz Deutschland, aber auch Besucher aus Armenien, Finnland, Italien, Kanada, den Niederlanden, Norwegen, Polen, Russland, Schweden, der Ukraine und den USA.

Partner des IPP in der Arbeitsgruppe „Vision Fusion“ war der ITER-Förderverband/Region Greifswald. Gemeinsam veranstaltete die Arbeitsgruppe im IPP-Teilinstitut Greifswald im Juli die wissenschaftshistorische Konferenz „Das Feuer des Prometheus - Energie gestern, heute und morgen“. Die Bedeutung der Energiefrage wurde durch eine Darstellung der Energieversorgung von der Antike bis in die Gegenwart und Zukunft in weitem Bogen historisch umrissen.

Eröffnung der neuen Gebäude des IPP-Teilinstituts Greifswald (von links): Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn, MPG-Präsident Hubert Markl, Bundeskanzler Gerhard Schröder und Ministerpräsident Harald Ringstorff.



Foto: Ulrich Schwenn

In das gleiche Jahr fiel die Festveranstaltung anlässlich des Umzugs in die neuen, nach dreijähriger Bauzeit termin- und budgetgerecht fertiggestellten Gebäude des Greifswalder Teilinstituts. Am 7. Juli wurden sie in Anwesenheit von Bundeskanzler Gerhard Schröder, Ministerpräsident Dr. Harald Ringstorff sowie zahlreicher weiterer Ehrengäste feierlich eröffnet.

Hauptsächlich an ein Industrie-Publikum gerichtet, präsentierte das IPP im November 2000 seine Forschungsarbeiten im POSCO-Zentrum in Seoul/Südkorea im Rahmen der Europäischen Wanderausstellung „Fusion EXPO“. Anschließend wurde die Ausstellung für zehn Tage im Korean Basic Science Institute in Taejon gezeigt, wo die große Fusionsanlage KSTAR aufgebaut wird. Im Gegensatz hierzu vor allem für Schüler konzipiert war die Abenteuer-Ausstellung „Lebendige Wissenschaft“ der Helmholtz-Gemeinschaft im Deutschen Museum München im November 2000, auf der das IPP die Fusionsforschung mit einem „Plasma zum Anfassen“ präsentierte sowie anhand eines Modells der Forschungsanlage ASDEX Upgrade. Mit mehreren Vorträgen beteiligte sich das IPP zudem an der Reihe „Quarks, Quanten, Quasare“, die im Jahr 2000 von den Münchner Max-Planck-Instituten und der Universität München anlässlich des „Jahres der Physik“ veranstaltet wurde.

„Wissenschaft live!“ bot im März 2001 der „Tag der Offenen Tür“ im IPP in Garching im Rahmen eines bayernweiten „High-Tech-Tages“ gemeinsam mit den Instituten auf dem Garchinger Forschungsgelände. Auf dem Gemeinschaftsstand „Neue Energien“ des Landes Mecklenburg-Vorpommern präsentierte sich das IPP-Teilinstitut Greifswald im April 2001 auf der Hannover Messe. Mit

einem Modell des Stellarators WENDELSTEIN 7-AS, betreut und erläutert von Mitarbeitern des Stuttgarter Instituts für Plasmaforschung, beteiligte sich das IPP im Juli am Klimatag 2001 der Universität Stuttgart. Zum „Wissenschaftssommer Berlin 2001“ trug das IPP mit der Präsentation der Europäischen Wanderausstellung „Fusionsforschung - Die Energie der Sterne“ bei. Sie wurde eine Woche lang im Deutschen Technikmuseum in Berlin gezeigt und zog dann für weitere drei Wochen um in die Urania. Anlässlich der Berliner „Langen Nacht

der Wissenschaften“, an der zahlreiche Forschungseinrichtungen teilnahmen, öffnete auch der Berliner IPP-Bereich am 15. September seine Türen und präsentierte seine Forschungsarbeit. Bis zwei Uhr nachts konnte man rund 750 Besucher begrüßen. Schließlich beteiligte sich das IPP an einer Ausstellung für die 3000 Besucher des 18. Weltenergiekongresses im argentinischen Buenos Aires, der alle drei Jahre Entscheidungsträger aus Wirtschaft, Forschung und Politik zusammenführt, um über Stand und Zukunft der Energieversorgung zu diskutieren.

Das IPP-Jubiläum „Energie für die Zukunft - 10 Jahre ASDEX Upgrade, 20 Jahre Stellaratorprinzip, 30 Jahre MPI, 40 Jahre IPP“ feierte das IPP in Anwesenheit des Bayerischen Ministerpräsidenten Dr. Edmund Stoiber sowie zahlreicher weiterer Ehren Gäste.

Die Vernissage „Kunst am Bau“ im Juli 2000 im Teilinstitut Greifswald, auf der Kunststudenten der Universität Greifswald ihre Arbeiten und Entwürfe für das Greifswalder Institutsgebäude präsentierten, bildete den Auftakt für mittlerweile fest etablierte Kunstausstellungen: Zahlreiche Institutsmitarbeiter und Bürger der Stadt besuchten im Mai 2001 die Ausstellung „Auf dem Wege sein - elf Künstler aus Mecklenburg-Vorpommern“, besahen im August in der Ausstellung „Triaxialkontakt“ Malereien, Objektinstallationen und Multimediales des Greifswalder Künstlers Christian Altvater und durchstreiften im September „Interplanetare Räume“ von Hans-Albert Walter.

Spezielle Angebote hält das IPP für Schüler bereit: Hierzu gehört das Physikprojekt „Erforscht die Welt der Wellen“, mit dem sich die Abteilung Öffentlichkeitsarbeit im Juli 2001 an der Aktion „Mädchen machen Technik“ der Technischen Universität München beteiligte. Die zehn- bis zwölfjährigen Schülerinnen stellten Dosentelefone her, leere Bierflaschen wurden zu Blasinstrumenten und Weingläser wurden auf ihre Klangfähigkeit geprüft. Mit Mikrofon und Oszillograph wurden die Töne sichtbar gemacht. Hinzu kamen Lichtversuche mit verschiedenen Linsen, Lampen, Beugungsgittern und Prismen sowie Experimente mit dem Licht- und Rasterelektronenmikroskop. Im gleichen Rahmen bot das IPP im August 2001 die Veranstaltung „Die eigene Seite im Internet gestalten“ an. An etwas ältere, 17- bis 19-jährige Jugendliche richtete sich das Schülerpraktikum „Umwelt und Energie“ der Universität Augsburg im Frühjahr 2001. Hier

stellte das IPP Gerätschaften und Betreuung für das Thema „Energieeffizienz“.

An Schüler, Auszubildende und Studenten richtete sich auch die Präsentation des IPP-Teilinstituts Greifswald auf dem „Berufsstartertag“, einer Ausbildungsmesse für Schulabgänger in Greifswald im Januar 2001, das Bildungsprogramm „Zukunft & Energie“ in der Jugendherberge Greifswald, die Präsentation des Teilinstituts auf der Messe „Ausbildung und Arbeit in Vorpommern“ im September 2001 sowie ein Informationsstand auf der Veranstaltung „Arbeit und Ausbildung in Mecklenburg-Vorpommern“ in einem Greifswalder Einkaufszentrum. Für die alljährlich von sämtlichen Greifswalder Schulen ausge-

Foto: Ulrich Schwen



Die IPP-Präsentation auf der Abenteuer-Ausstellung „Lebendige Wissenschaft“ der Helmholtz-Gemeinschaft im Deutschen Museum München im November 2000.

tragene Mathematikolympiade stiftete das Teilinstitut einen Preis und beteiligt sich an der Betreuung. Die Zeugnisausgabe der Verbundenen Haupt- und Realschule „Max Planck“ im Juni 2001 fand im IPP-Teilinstitut Greifswald statt.

Zahlreiche Besucher, Gruppen von Studenten, Schülern, interessierten Bürgern ebenso wie Einzelbesucher aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft aus dem In- und Ausland nutzten die Gelegenheit, durch einen Besuch im IPP Einblick in die Fusionsforschung zu gewinnen - im Jahr 2001 rund 2000 Personen in Garching und 5300 im Teilinstitut Greifswald.

Organisatorischer Aufbau des IPP

Das Institut für Plasmaphysik (IPP) wurde 1960 als gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung gegründet. Gesellschafter waren die Max-Planck-Gesellschaft und Professor Werner Heisenberg. Ab 1971 wurde das IPP als Max-Planck-Institut für Plasmaphysik fortgeführt. Durch einen Assoziationsvertrag mit Euratom von 1961 wurde das Institut in das Europäische Fusionsprogramm integriert. Hauptsitz des Instituts ist Garching bei München. 1992 wurde das IPP um eine Außenstelle in Berlin erweitert, 1994 wurde das Teilinstitut Greifswald gegründet.

Das Institut ist zur Zeit in zwölf wissenschaftliche Bereiche aufgegliedert: In den Garchinger Bereichen **Experimentelle Plasmaphysik 1, 2 und 3** werden die Experimente ASDEX Upgrade bzw. WENDELSTEIN 7-AS betrieben. Der Bereich **Experimentelle Plasmaphysik 4** bearbeitet die Randschichtphysik des Plasmas und hat dazu übergreifende Diagnostikaufgaben übernommen. Der Bereich **Materialforschung** entwickelt und untersucht Materialien für plasmabelastete Komponenten. Der Bereich **Oberflächenphysik** betreibt vorwiegend experimentelle Arbeiten zur Plasma-Wand-Wechselwirkung. Für die Plasmaheizung an den Experimenten verantwortlich ist der Bereich **Technologie**. Der Bereich **Tokamakphysik** befasst sich mit der theoretischen Unterstützung der Tokamak-Aktivitäten des IPP. Im Teilinstitut Greifswald betreut der Bereich **WENDELSTEIN 7-X Aufbau** die Errichtung des Stellarators WENDELSTEIN 7-X. Der Bereich **Experimentelle Plasmaphysik 5** beschäftigt sich mit der Plasmarandphysik und Magnetohydrodynamik für WENDELSTEIN 7-X; der Bereich **Stellaratortheorie** bearbeitet theoretische Fragen des Stellarators. Der Bereich **Plasmadiagnostik** in Berlin beschäftigt sich vornehmlich mit der Verunreinigungsproblematik sowie der Physik der Plasma-Randschicht und ist an der Vorbereitung von WENDELSTEIN 7-X beteiligt.

Trägerorganisation des IPP ist die **Max-Planck-Gesellschaft**. Sie erlässt die Institutsatzung, beruft die Wissenschaftlichen Mitglieder des Instituts, überprüft die satzungs-

gemäß zu erstattenden Berichte und wirkt im Kuratorium mit.

Finanzierungsträger des Instituts sind (Prozentanteile jeweils bezogen auf den Gesamthaushalt des IPP):

- die Bundesrepublik Deutschland, die 2001 rund 57,2 Prozent der Ausgaben finanzierte,
- der Freistaat Bayern, der sich mit 3,3 Prozent beteiligte,
- das Land Berlin mit 0,3 Prozent,
- das Land Mecklenburg-Vorpommern mit 6,6 Prozent
- die Europäische Union (EURATOM) mit 32,5 Prozent.

Das **Kuratorium** hat eine unterstützende und allgemeine Aufsichts- und Entscheidungsfunktion. Es berät mit dem Direktorium und der Wissenschaftlichen Leitung das wissenschaftliche Programm und die sich daraus ergebenden Folgen für den Haushaltsplan. Nach Abschluss der Haushaltsverhandlungen mit den Finanzierungsträgern stellt das Kuratorium den Haushaltsplan fest und tritt insoweit an die Stelle des Senats der Max-Planck-Gesellschaft. Mitglieder des Kuratoriums sind im Jahr 2002:

Prof. Dr. Peter Gruss, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, (Vorsitzender); Ministerialdirigent Hermann Fischer, Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur des Landes Mecklenburg-Vorpommern; Dr.-Ing. Peter Grassmann, Sprecher des Vorstandes Carl Zeiss; Prof. Dr. Herwig Schopper, CERN, Genf; Ministerialdirektor Dr. Hermann Schunck, Bundesministerium für Bildung und Forschung; Ministerialdirektor Dr. Wolfgang Quint, Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst; Prof. Dr. Claus Weyrich, Leiter der Zentralabteilung für Forschung und Entwicklung, Siemens AG; Prof. Dr. Wolfgang Wild, Staatsminister a.D., (Ehrenkurator).

Ein **Fachbeirat** berät das Institut in allen wissenschaftlichen Fragen. Er erstattet dem Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft jährlich einen Bericht über die wissenschaftliche

Arbeit des Instituts, den es zugleich dem Kuratorium und der Wissenschaftlichen Leitung des Instituts zuleitet. Mitglieder sind im Jahr 2002: Prof. Dr. Ronald Parker (Vorsitzender), Plasma Science and Fusion Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA; Dr. Carlos Alejandre Losilla, Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, Madrid, Spanien; Dr. Henrik Bindslev, Optics and Fluid Dynamics Department, Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark; Prof. Dr. James F. Drake, Institute for Plasma Research, University of Maryland, USA; Prof. Dr. Albrecht Goldmann, Fachbereich Physik, Universität Kassel; Dr. Kai Graßie, Forschungslaboratorien Philips GmbH, Aachen; Prof. Dr. Rudolf Gross, Physik-Department, Technische Universität München; Prof. Dr. Jürgen Meichsner, Institut für Physik, Universität Greifswald; Dr. Jérôme Paméla, Culham Science Centre, Abingdon, Großbritannien; Dr. Masahiro Seki, Department of Fusion Engineering Research, Japan Atomic Energy Research Institute, Naka, Japan; Prof. Dr. Karl Heinz Spatschek, Institut für Theoretische Physik, Universität Düsseldorf; Dr. Ronald D. Stambaugh, DIII-D Program, General Atomics, San Diego, USA; Prof. Dr.-Ing. Erich Tenkhoff, Erlangen.

Die **Wissenschaftliche Leitung** des IPP, die aus den ständig im Institut tätigen Wissenschaftlichen Mitgliedern mit Leitungsfunktion besteht, stellt das Forschungsprogramm auf und beschließt den Zeit-, Personal- und Finanzrahmen der Forschungsaufgaben, die Organisationsstruktur des wissenschaftlichen Bereiches, die Beauftragung von Wissenschaftlern mit Leitungsaufgaben und im Zusammenwirken mit dem Direktorium die Anstellung, Eingruppierung und Entlassung des wissenschaftlichen Personals. Ihm gehören 2002 an:

Prof. Dr. Alexander M. Bradshaw, (Vorsitzender und Wissenschaftlicher Direktor), Prof. Dr. Kurt Behringer, Prof. Dr. Harald Bolt, Prof. Dr. h.c. Volker Dose (stellvertretender Vorsitzender), Prof. Dr. Gerd Fußmann, Prof. Dr. Sibylle Günter, Prof. Dr. Michael Kaufmann, Prof. Dr. Thomas Klinger, Prof. Dr. Jürgen Küppers, Prof. Dr. Karl Lackner (beurlaubt), Prof. Dr. Jürgen Nührenberg, Prof. Dr. Friedrich Wagner, Prof. Dr. Rolf Wilhelm, Prof. Dr. Hartmut Zohm.

Emeritierte Wissenschaftliche Mitglieder sind: Dr. Gerhard von Gierke, Dr. Günter Grieger, Prof. Dr. Friedrich Hertweck, Prof. Dr. Dieter Pfirsch, Prof. Dr. Klaus Pinkau, Prof. Dr. Arnulf Schlüter.

Auswärtige Wissenschaftliche Mitglieder sind: Prof. Dr. Allen H. Boozer, Prof. Dr. Folker Engelmann, Prof. Dr. Rudolf Wienecke.

Das **Direktorium** besorgt die laufenden Geschäfte, entscheidet über die Verwendung der Haushaltsmittel, überwacht und regelt den Ablauf der Forschungsarbeiten, beschließt über die Anstellung, Eingruppierung und Entlassung des Personals und vertritt das Institut nach innen und außen. Ihm gehören 2002 an:

Prof. Dr. Alexander M. Bradshaw (Vorsitzender), Prof. Dr. Michael Kaufmann, Prof. Dr. Friedrich Wagner, Dr.-Ing. Karl Tichmann.

Der nach dem Assoziationsvertrag mit EURATOM gebildete **Lenkungsausschuss**, dem Vertreter der Kommission der Europäischen Union und des IPP angehören, legt das gemeinsame Forschungsprogramm fest, leitet dessen Durchführung, überwacht die Arbeiten, beschließt über Aufbau und Zusammensetzung der Forschungsgruppen und entscheidet über Einzelausgaben ab 200.000,- Euro. Der Lenkungsausschuss setzt sich 2002 zusammen seitens der Kommission der Europäischen Union in Brüssel:

Dr. Umberto Finzi (Vorsitzender), Prof. Dr. Hardo Bruhns, Johannes Spoor;

seitens des Instituts: Prof. Dr. Alexander M. Bradshaw, Prof. Dr. Michael Kaufmann, Prof. Dr. Friedrich Wagner, Dr.-Ing. Karl Tichmann, Dr. jur. Michael Winkler.

Der aus gewählten Vertretern der wissenschaftlichen Mitarbeiter bestehende **Wissenschaftlerrat** berät die Wissenschaftliche Leitung insbesondere in Fragen des wissenschaftlichen Programms, bei Struktur- und Personalfragen. Ihm gehören 2002 an:

Dr. Albrecht Herrmann (Vorsitzender), Dr. Peter Franzen, Dr. Torsten Bräuer, Dr. Jürgen Gafert, Dr. Joachim Geiger, Dr. Ralf Kleiber, Dr. Michael Laux, Dr. Petra Nieckchen, Dr. Simon Pinches, Andreas Schott, Dr. Achim von Keudell.

Dem **Betriebsrat** gehören 2002 an:

IPP Garching: Günter Hussong (Vorsitzender), Roswitha Hiebl, Dr. Reinhard Drube, Dr. Karl Ertl, Jochen Fink, Christine Graßy, Josef Hausmann, Angelika Hohaus, Manfred Hunger, Kathrin Marx, Robert Semler, Reinhilde Weinfurter, Wolfgang Weissbart.

Teilinstitut Greifswald: Dr. Heinz Grote (Vorsitzender), Heike Schürmann, Cornelia Cordes, Alf Hölting, Friedhelm Nankemann, Corina Posselt, Sybille Schirmacher, Horstmar Schmidt, Detlef Wieseler.

Bereich Plasmadiagnostik, Berlin: Nils Rüter (Vorsitzender), Jürgen Sommer, Hans-Joachim Thallofer.

Literaturhinweise

Einführung in die Physik der Fusionsforschung:

Rebhan, Eckhardt: *Heißer als das Sonnenfeuer. Plasmaphysik und Kernfusion*. München 1992.

Schumacher, Uwe: *Fusionsforschung. Eine Einführung*. Darmstadt 1993.

Bosch, Hans-Stephan; Bradshaw, Alexander M.: *Kernfusion als Energiequelle der Zukunft*, in: *Physikalische Blätter* 57/11, 2001, Seite 55-60.

Hamacher, Thomas; Bradshaw, Alexander M.: *Fusion as a future power source. Recent achievements and prospects*, in: *Proceedings of the 18th World Energy Congress*, Buenos Aires 2001. World Energy Council (Hrsg.), London 2002, 01-06-06.

Gruber, Otto et al.: *Overview of ASDEX Upgrade results*, in: *Nuclear Fusion*, Band 41, Nummer 10, 2001, Seite 1369-1389.

Gruber, Otto; Kaufmann, Michael; Köppendörfer, Walter; Lackner, Karl; Neuhauser, Josef: *Physics background of the ASDEX Upgrade Project*, in: *Journal Nuclear Material* 121, 1984, Seite 71-77.

Brossmann, Ulf; Dommaschk, Walter; Herrnegger, Franz; Grieger, Günter; Kisslinger, Johann; Lotz, Wolfgang; Nührenberg, Jürgen; Rau, Fritz; Renner, Hermann; Ringler, Heinz; Sapper, Jörg; Schlüter, Arnulf; Wobig, Horst: *Concept of an advanced stellarator*, in: *Proceedings of the 9th Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Baltimore 1982, Bd. 3, Wien 1983, Seite 141-157.

Grieger, Günter; Milch, Isabella: *Das Fusions-experiment WENDELSTEIN 7-X*, in: *Physikalische Blätter* 49/11, 1993, Seite 1001-1005.

Erckmann, Volker; Hartfuß, Hans-Jürgen; Kick, Manfred; Renner, Hermann; Sapper, Jörg; Schauer, Felix; Speth, Eckehart; Wesner, Fritz; Wagner, Friedrich; Wanner, Manfred; Weller, Arthur; Wobig, Horst; W7AS-Team; W7X-Teams in Garching, Karlsruhe (FZK) und Stuttgart (IPF, Universität Stuttgart): *The WENDELSTEIN 7-X Project: Scientific basis and technical realization*, in: *Proceedings of the 17th Symposium on Fusion Engineering*, San Diego, 1997. IEEE (Hrsg.), Piscataway, NJ, 1998, Seite 40-48.

Beidler, Craig; Harmeyer, Ewald; Herrnegger, Franz; Igitkhanov, Yuri; Kendl, Alexander; Kisslinger, Johann; Kolesnichenko, Ya.I.; Lutsenko, V.V.; Nührenberg, Carolin; Sidorenko, Irina; Strumberger, Erika; Wobig, Horst; Yakovenko, Yu, V.: *The Helias reactor HSR4/18*, in: *Nuclear Fusion*, Band 41, Nummer 12, Dezember 2001, Seite 1759-1766.

Lackner, Karl: *Der nächste Schritt zum Fusionskraftwerk*, in: *Spektrum der Wissenschaft*, Juni 2000, Seite 86 - 90.

Wolf, Gerd: *Kernfusion mit magnetischem Einschluss. Evolution und Konkretisierung - der nächste Schritt*, in: *Physikalische Blätter* 54/12, 1998, Seite 1109-1113.

Zu technischen Fragen:

Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *Nachrichten - Werkstoffe für hohe Belastungen*. 31. Jahrgang, 1/1999.

Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hrsg.): *Nachrichten - Technik für die Kernfusion*, 29. Jahrgang, 1/1997.

Raeder, Jürgen; Bünde, Rolf; Dänner, Wolfgang; Klingelhöfer, Rolf; Lengyel, Lajos; Leuterer, Fritz; Söll, Matthias: *Kontrollierte Kernfusion. Grundlagen ihrer Nutzung zur Energieversorgung*. Stuttgart 1981.

Zu Sicherheits- und Umweltfragen:

Cook, I.; Marbach, G.; Di Pace, L.; Girard, C.; Taylor, N. P.: *Safety and Environmental Impact of Fusion*. EFDA-Report Nr. EFDA-S-RE-1, 2001.

Raeder, Jürgen; Cook, Ian; Morgenstern, F.; Salpietro, Ettore; Bünde, Rolf; Ebert, Edgar: *Safety and Environmental Assessment of Fusion Power*. Report of the SEAFP Project (EURFUBRU XII-217/95), Brüssel 1995.

Zu sozio-ökonomischen Fragen:

Hörning, Georg; Keck, Gerhard; Lattewitz, Florian: *Fusionsenergie - eine akzeptable Energiequelle der Zukunft? Eine sozialwissenschaftliche Untersuchung anhand von Fokusgruppen*. Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Arbeitsbericht Nr. 145, August 1999.

Lako, P.; Ybema, J. R.; Seebregts, A. J.: *Long-term scenarios and the role of fusion power*. Netherlands Energy Research Foundation (ECN), ECN-C-98-095, Februar 1999.

Hamacher, Thomas et al.: *A comprehensive evaluation of the environmental external costs of a fusion power plant*, in: *Fusion Engineering and Design* 56-57, 2001, Seite 95-103.

Hender, T. C.; Knight, P. J.; Cook, I.: *Key issues for the economic viability of magnetic fusion power*, in: *Fusion Technology*, Band 30, Dezember 1996, Seite 1605-1612.

Zur historischen Entwicklung:

Shaw, E.N.: *Europe's Experiment in Fusion, the JET Undertaking*. Amsterdam 1990.

Heppenheimer, T. A.: *The Man-Made Sun*. Boston 1984.

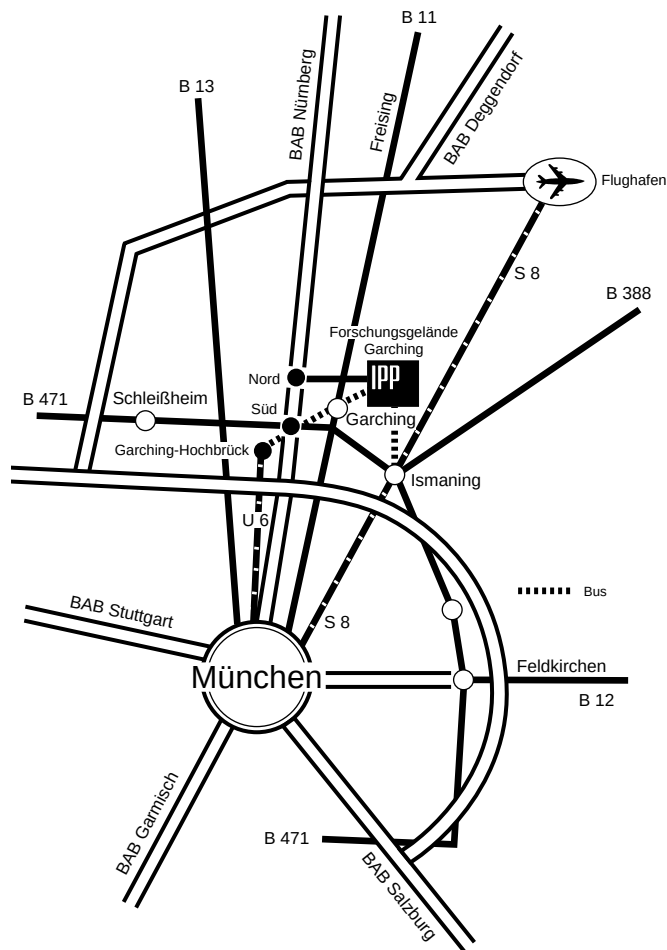
Bromberg, Joan L.: *Fusion - Science, Politics and the Invention of a new Energy Source*. Cambridge Mass. 1983.

Wie erreichen Sie das IPP?

in Garching:

Mit dem PKW:
auf der Autobahn
München-Nürnberg,
Ausfahrt Garching-Nord.

Mit Öffentlichen
Verkehrsmitteln:
ab Hauptbahnhof mit der
S-Bahn bis Marienplatz,
U-Bahn U6 bis Garching-
Hochbrück; dann Bus 291
oder 691 oder:
S8 bis Ismaning,
dann Bus 230.

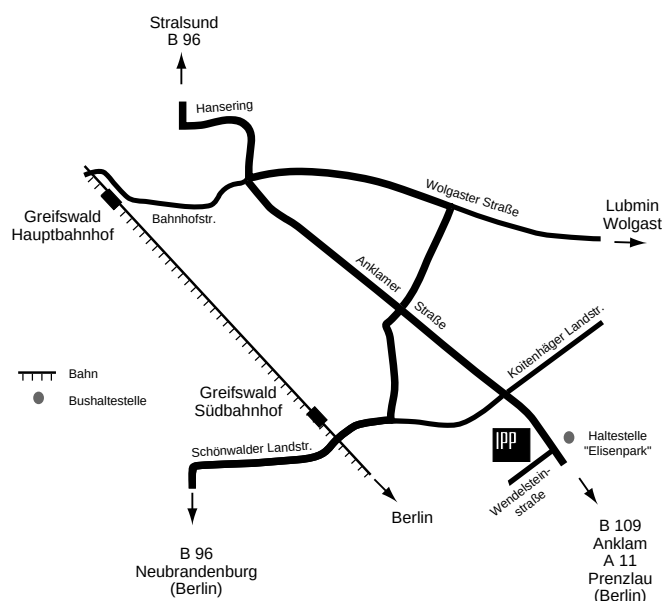


in Greifswald:

Mit dem Flugzeug:
über Berlin: von Berlin-Tegel
mit Bus X9 zum Bahnhof
Zoologischer Garten, mit
dem Zug nach Greifswald
über Hamburg: vom
Flughafen zum
Hauptbahnhof, mit dem Zug
nach Greifswald.

Mit dem PKW:
über Berlin, Neubrandenburg
nach Greifswald oder über
Hamburg, Lübeck, Stralsund
nach Greifswald, im
Stadtgebiet der
Beschilderung „Max-Planck-
Institut“ folgen

Mit dem Bus:
Ab Greifswald-Hauptbahnhof
mit dem Bus Nr. 2 oder 3 bis
Haltestelle „Elisenpark“.





Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik

Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching bei München
Telefon 0 89/32 99-01

Teilinstitut Greifswald
Wendelsteinstraße 1
D-17489 Greifswald
Telefon 0 38 34/88-10 00

info@ipp.mpg.de
www.ipp.mpg.de

