

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 Metaldichtungen 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.

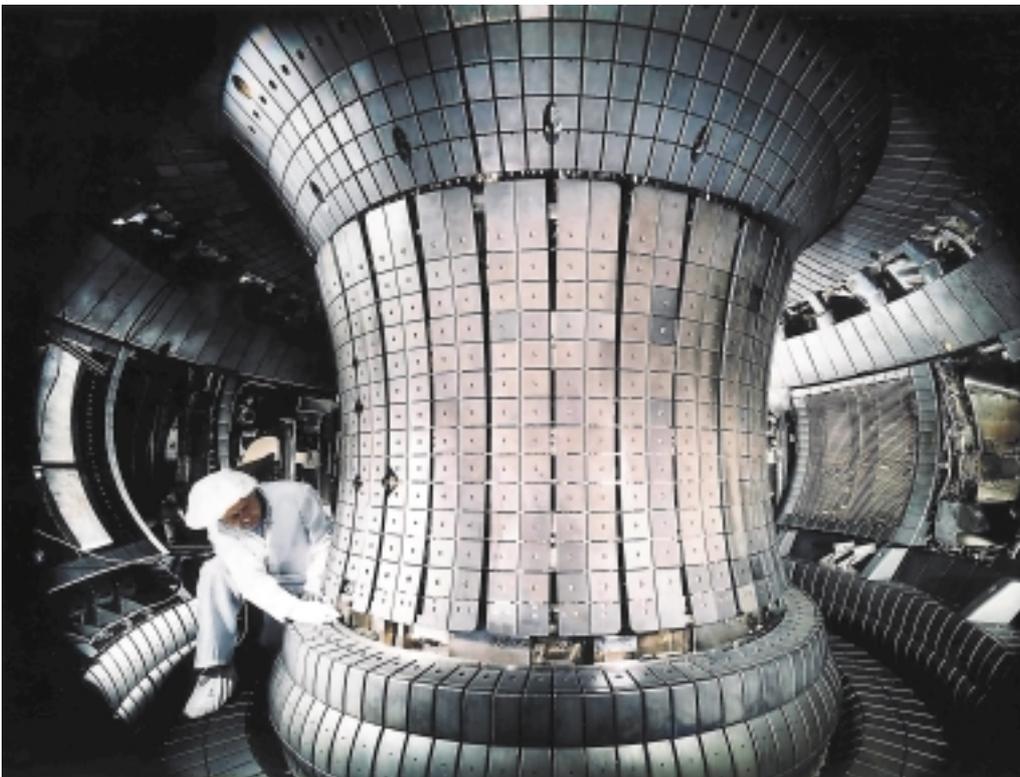
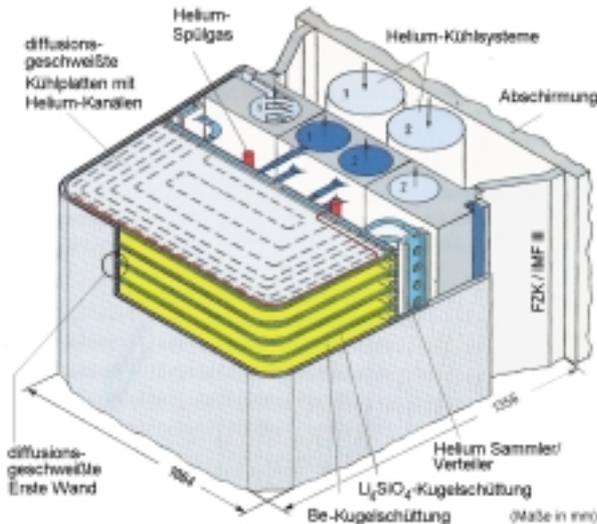


Foto: Thomas Henningsen

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

Grafik: Forschungszentrum Karlsruhe

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-

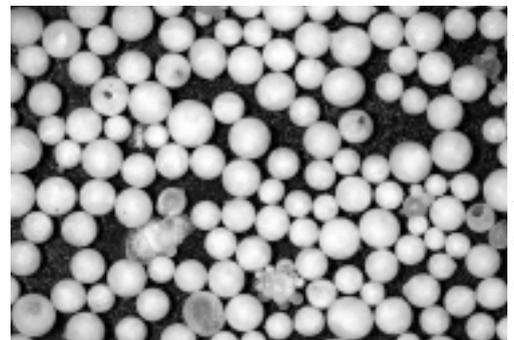


Foto: Forschungszentrum Karlsruhe

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

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



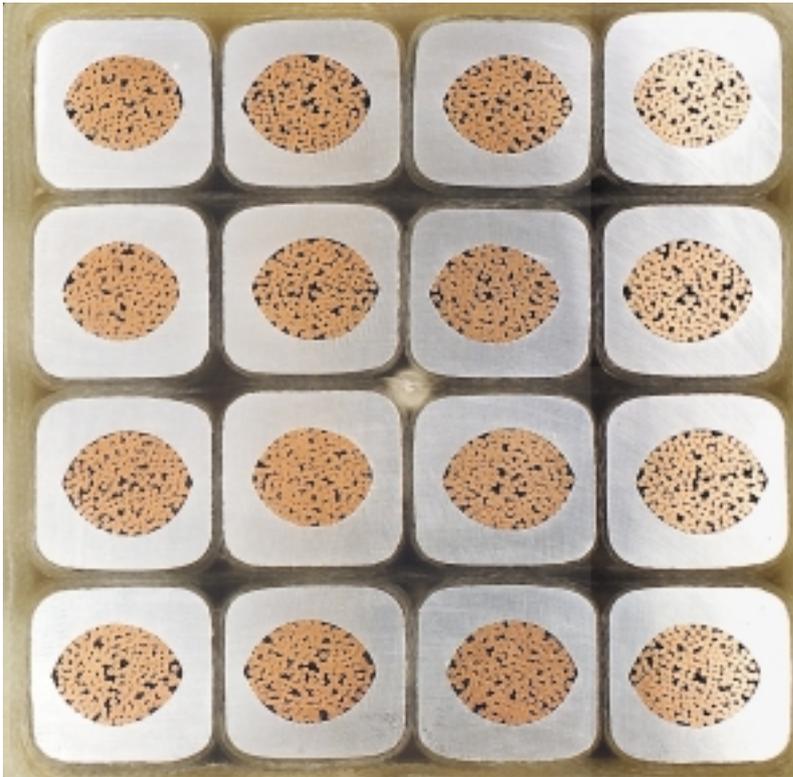
Für ITER ist in der ersten Betriebsphase ein Abschirmblanket vorgesehen; erst später sollen auch Module des Brutblankets erprobt werden. Um die Herstellbarkeit des Abschirmblankets zu prüfen, wurden zwei Module in Originalgröße gefertigt. Hier einer der Prototypen.

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
harz imprägnierte
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.**

1 cm

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

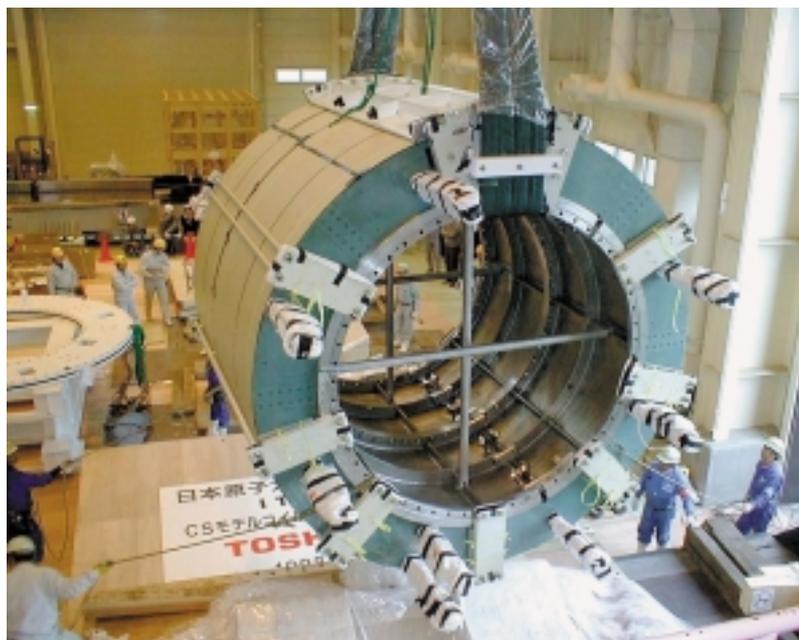


Foto: ITER

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.

Die Transformator-Probespule für den internationalen Experimentalreaktor ITER

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.

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

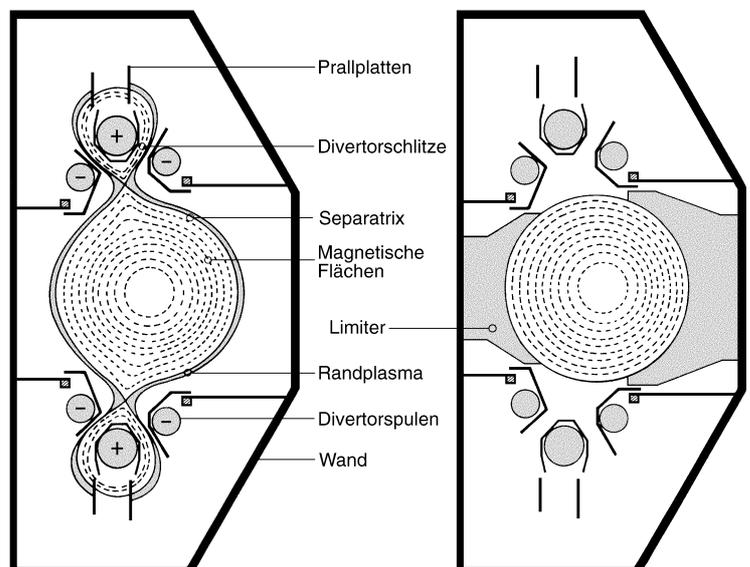
Leistungsfähiger als Limiter sind Anordnungen, die den direkten Kontakt des eingeschlossenen Plasmas mit Wand oder Limiter vermeiden. Dies wird möglich, wenn das Magnetfeld so gestaltet wird, dass auf eine geschlossene äußere Magnetfläche - den letzten geschlossenen „Jahresring“ - nur noch offene Magnetflächen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

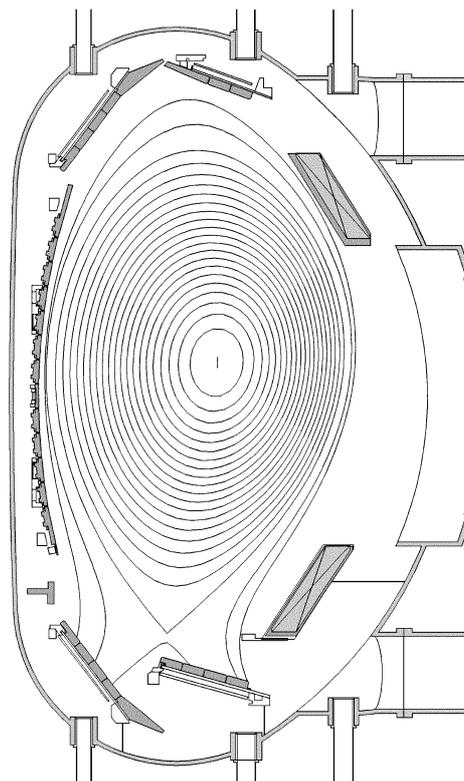
Divertor

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.

Brennstoff-nachfüllung

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.

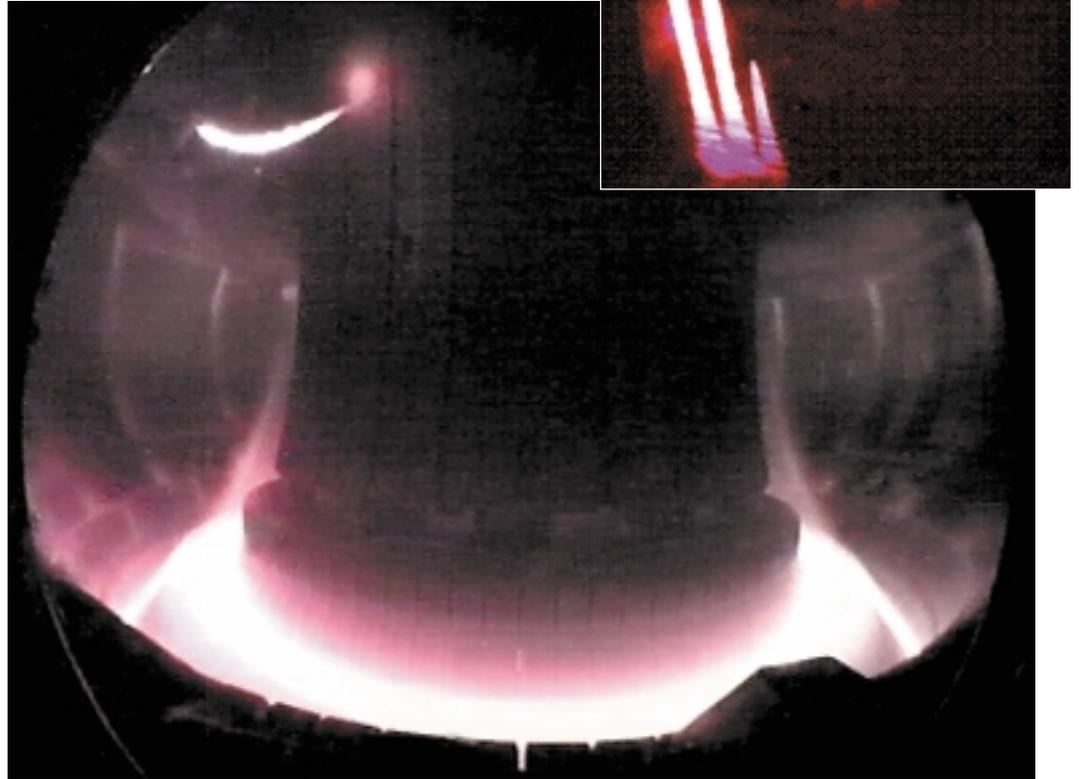
können. In Gaskanonen oder Zentrifugen beschleunigt, werden sie in das heiße Plasma hineingeschossen, wo sie wieder verdampfen und die einzelnen Atome ionisiert werden.

Da die Pellets den Brennstoff tief im Plasmaminneren 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 Pelletenzentrifuge 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.

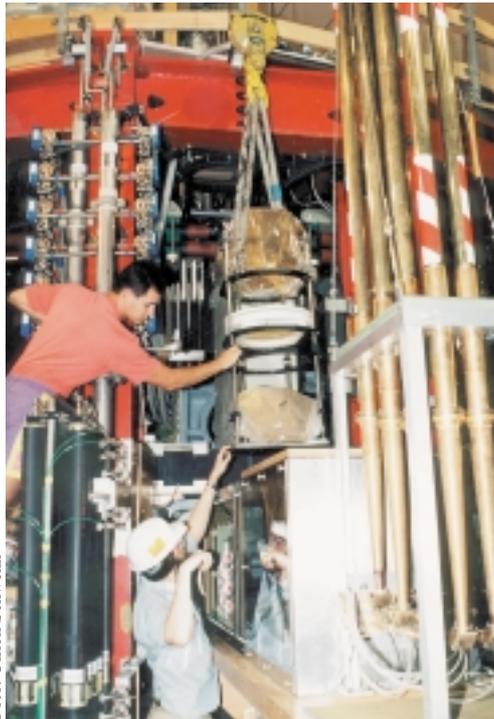


Foto: Ulrich Schwenn

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.