

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 Spulenkonzert 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 Spulenkonzert 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.

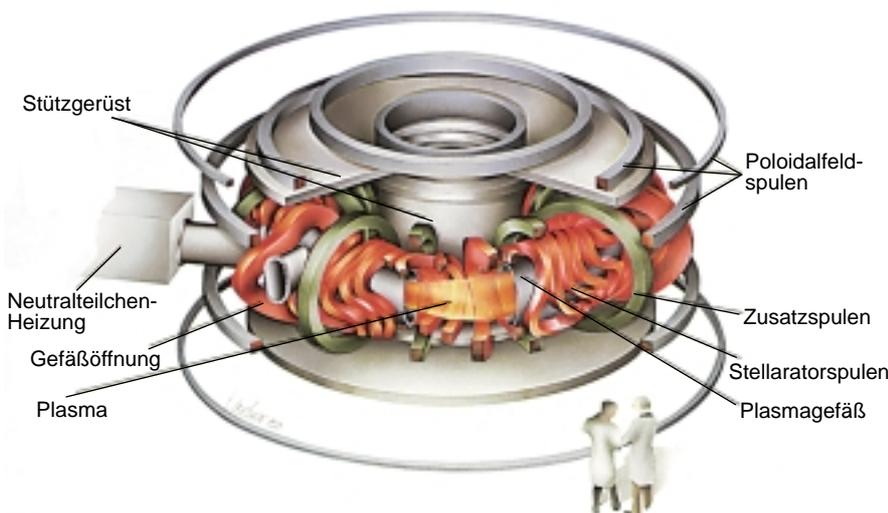
Kernstück von WENDELSTEIN 7-AS ist der Kranz aus 45 Stellaratorspulen, der das gesamte zum Plasmaeinschluss nötige Feld produziert (siehe Abbildung). Überlagerte toroidale und vertikale Felder, die von zusätzlichen Spulen erzeugt werden, können dieses System verändern. So lässt sich der Einfluss unterschiedlicher 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 Elektron-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 Elektronenzyklotron-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

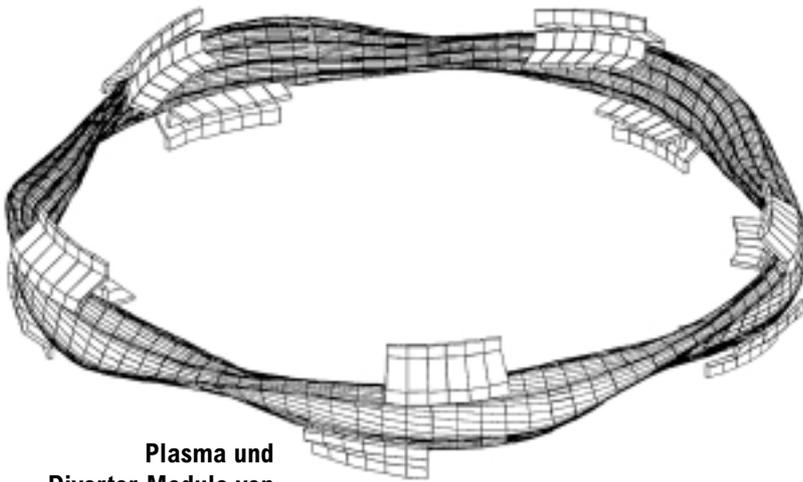
elektrostatische Wellen, ähnlich den Schallwellen, umzuwandeln. So konnte der Einsatzbereich der Elektron-Zyklotronheizung zu extrem hohen Plasmadichten ausgeweitet werden. Da bei diesen hohen Dichten an WENDELSTEIN 7-AS Plasmazustände mit besonders attraktiven Eigenschaften gefunden wurden, ist diese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

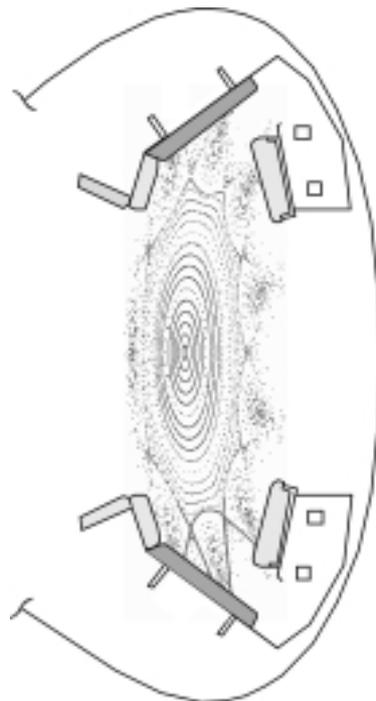


Plasma und Divertor-Module von WENDELSTEIN 7-AS

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. Plasmanahe 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 Einschusszeit 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 Ionentemperaturen 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 Ionentemperaturen 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 Einschussverschlechterung erkennbar.

1992 ist es in WENDELSTEIN 7-AS weltweit erstmalig gelungen, das bei den Tokamaks so erfolgreiche H-Regime mit seinen verbesserten Einschusseigenschaften 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-

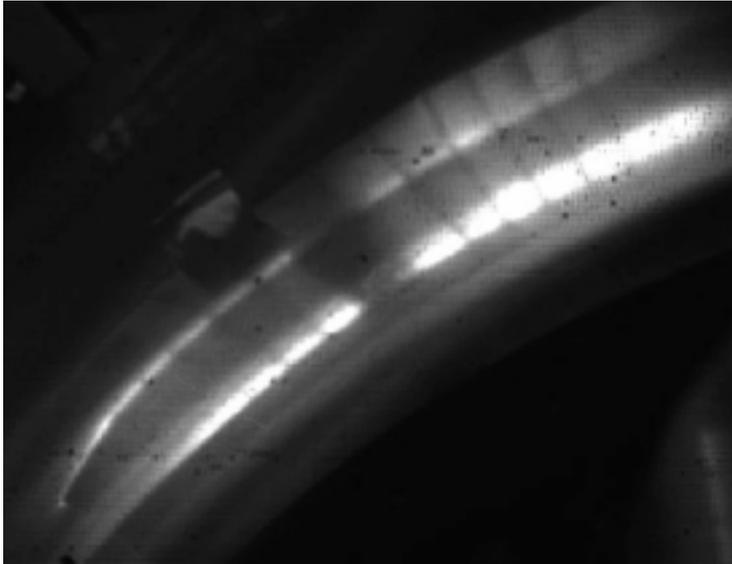
STEIN 7-AS wesentlich kleiner ist als die heutigen Tokamaks und die Ergebnisse in einem limiterbegrenzten Plasma erzielt wurden, so ergeben sich für einen größeren und mit Divertor ausgerüsteten Stellarator wie WENDELSTEIN 7-X günstige Perspektiven.

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 Einschussgüte 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.

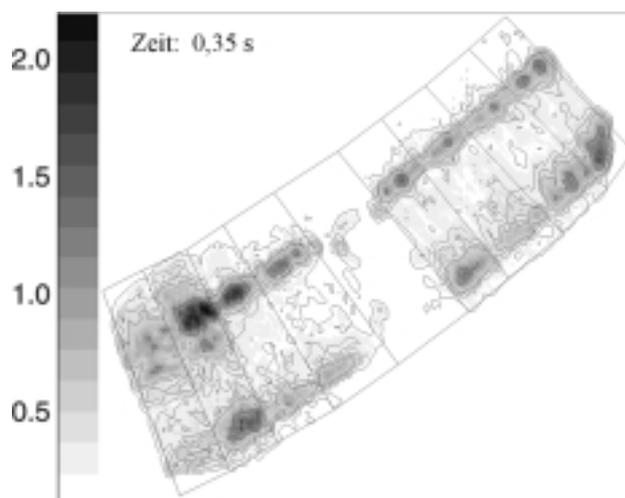
Zum Verständnis der Divertorexperimente mussten Computerprogramme weiterentwickelt oder neu geschrieben werden, die speziell die dreidimensionale Struktur und andere Eigenschaften des „Insel-Divertors“ berücksichtigen. Diese Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen; der Vergleich mit den Messergebnissen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

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

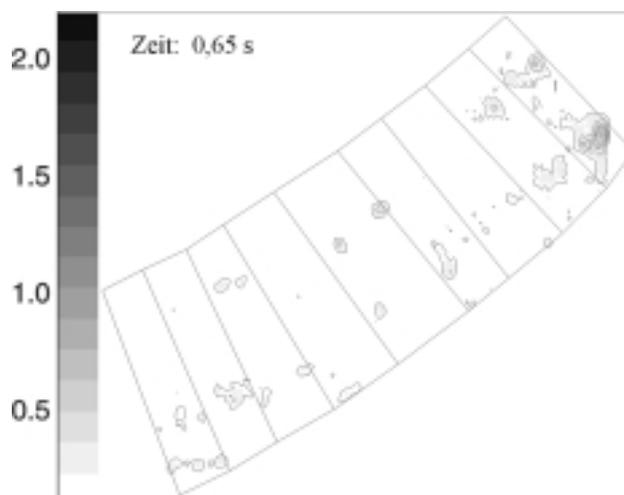
trieren - zum Teil mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung - Plasmadichte und Plasmatemperatur, die vom Plasma ausgesandte elektromagnetische Strahlung und Fluktuationen. Die komplizierte nicht-axialsymmetrische Plasmagestalt macht es manchmal notwendig, an unterschiedlichen Positionen des Plasmaringes 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
Verscherung:	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

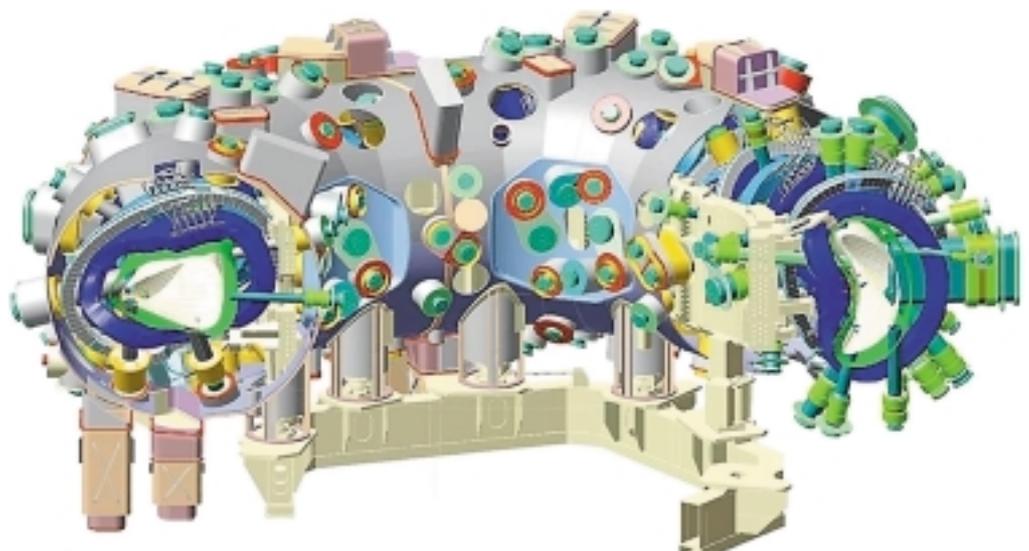
sichere Rückschlüsse auf ein Kraftwerksplasma zulassen.

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 Magnetspulen (grau) werden auf Supraleitungstemperatur abgekühlt. Für ihre Wärmeisolation sorgt ein Kryostat (grau). Dessen innere Wand ist das Plasmagefäß (grün). Stützen (grün) zum Anschluss von Messgeräten, 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,

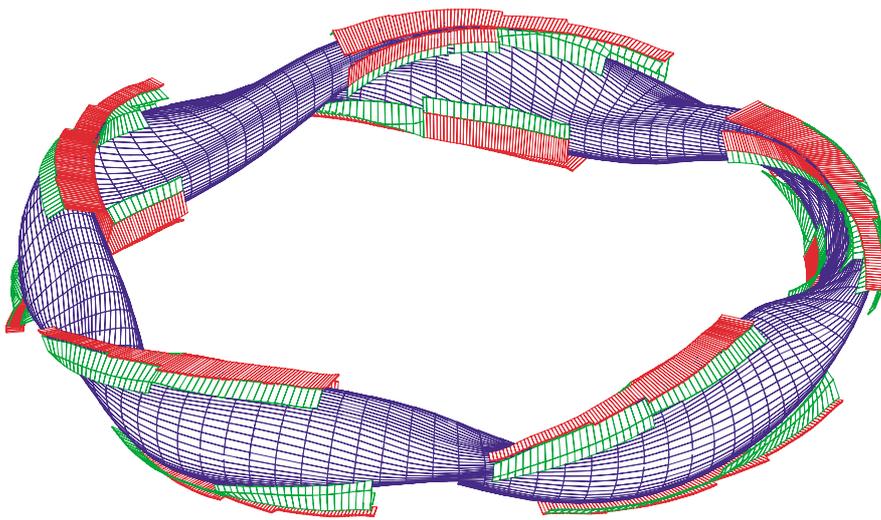


Foto: Forschungszentrum Karlsruhe

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 Lorentzkraft 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



Foto: Balcke-Dürr AG

Der Testkryostat beim Zusammenbau

standhalten. Aus den Prototypleitern 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,

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 Meganeutron 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.

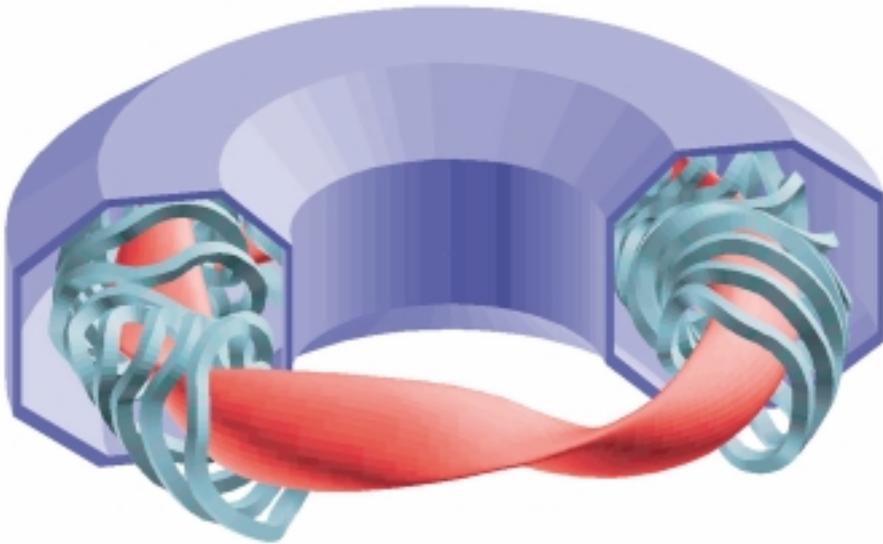
Entwicklungsbedarf bestand auch bei den Mikrowellensendern zur Aufheizung der



Foto: Forschungszentrum Karlsruhe

Das Prototyp-Gyrotron für WENDELSTEIN 7-X im Teststand in 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 Magnetspulen 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 Plasmapdruck 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
Plasmaström:	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-



Foto: Simon Ertl

Die Neutralinjektionsbox für ASDEX Upgrade beim Transport.