



Europa baut für Greifswald

Das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X nimmt Formen an.

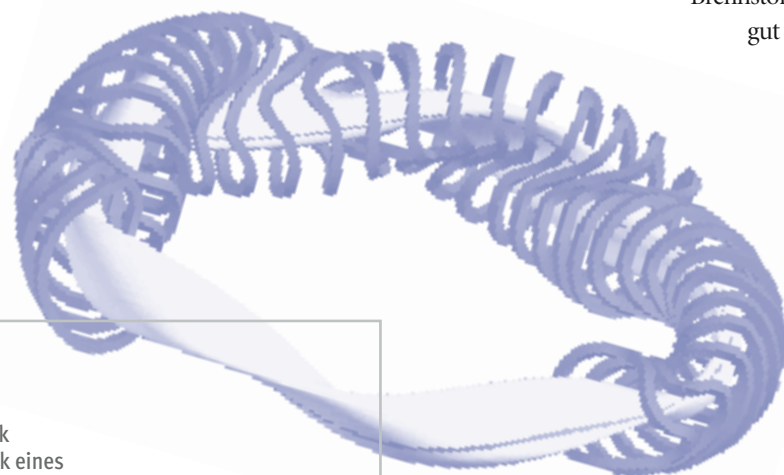
Ein Beitrag aus dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Firmen und Institute aus ganz Europa arbeiten an den Komponenten für das weltgrößte Fusionsexperiment vom Typ Stellarator in Greifswald. Die ersten Bauteile sind inzwischen angekommen: Magnetspulen, Teile des Plasmagefäßes und zwei Mikrowellensender für die Plasmaheizung. Im Jahr 2010 soll Wendelstein 7-X in Betrieb gehen.

Mehr als 800 Kilometer vom Mutterinstitut in Garching bei München entfernt entsteht Wendelstein 7-X. Benannt ist die Anlage wie ihre Vorgänger nach einem Berg in den Bayerischen Alpen – aufgebaut wird sie jetzt nahe der Ostseeküste in Greifswald. Hier hat das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) 1994 ein Teilinstitut gegründet. Beide Einrichtungen verfolgen das-

selbe Ziel: die Energieproduktion der Sonne auf der Erde nachzuahmen.

Ein Fusionskraftwerk soll Energie aus der Verschmelzung von Atomkernen gewinnen. Fusionsleistungen von mehreren Megawatt sind inzwischen realisierbar. Weil das Fusionsfeuer erst bei einer Temperatur von über 100 Millionen Grad zündet, muss der Brennstoff, ein dünnes Wasserstoff-Plasma, gut wärmeisoliert werden und darf nicht in Kontakt mit materiellen Wänden kommen. Von Magnetfeldern gehalten, schwebt das Plasma daher nahezu berührungsfrei im Inneren einer Vakuumkammer. Für diesen ma-



Die Computergrafik zeigt das Herzstück eines Stellarator-Experiments: Magnetspulen, die das heiße Plasma in einem Käfig einschließen.

Grafik: IPP



Energie



Foto: IPP

Teil des Plasmagefäßes für Wendelstein 7-X. Zwanzig dieser Elemente werden zu einem ringförmigen Gefäß zusammengefügt. Die Öffnungen machen das Plasma für Heizung, Pumpen und Messgeräte zugänglich.

gnetischen Käfig gibt es zwei alternative Bauarten: Tokamak und Stellarator. „Noch haben die Tokamaks die Nase vorn“, gibt Professor Friedrich Wagner zu; er ist ehemaliger Tokamak-Physiker und jetziger Leiter der „Unternehmung Wendelstein 7-X“. Nur mit einem Tokamak traut man sich heute ein brennendes Plasma zu und, wie mit dem internationalen Test-Reaktor ITER angepeilt, eine Fusionsleistung von 500 Megawatt.

Die Stärken des Stellarators

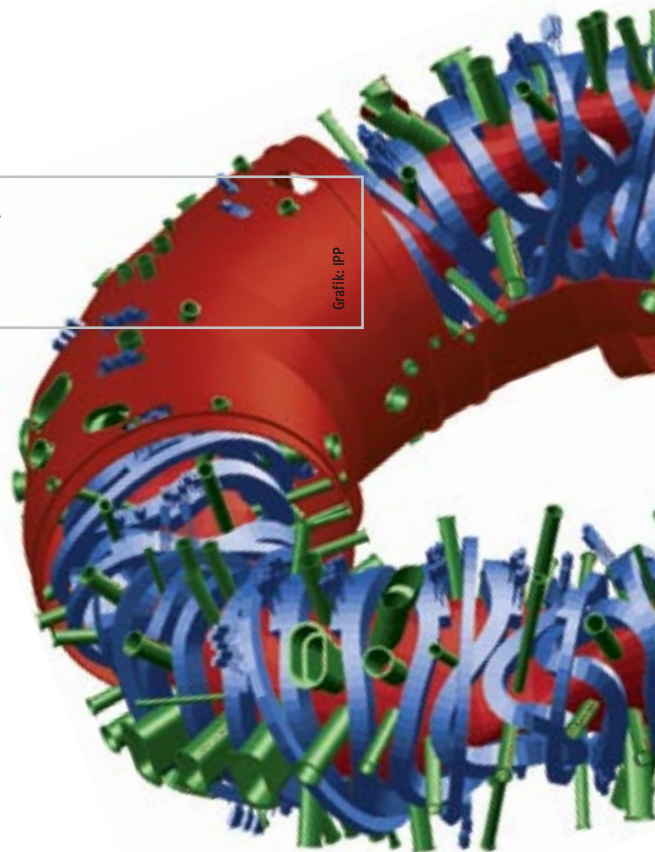
„Aber“, so Professor Wagner, „das Stellarator-Prinzip lässt Stärken erwarten, wo Tokamaks Schwächen zeigen“: Tokamaks können ohne Zusatzmaßnahmen nur gepulst arbeiten, Stellaratoren dagegen sind für den Dauerbetrieb geeignet. Denn ihr magnetischer Käfig entsteht, anders als beim Tokamak, allein durch Magnetspulen außerhalb des Plasmabereichs.

Von den insgesamt 50 Magnetspulen, die Wendelstein 7-X benötigt, wurden fünf bereits ausgeliefert. Ihre bizarren Formen sind das Ergebnis ausgefeilter Optimierungsrechnungen der Gruppe „Stellarator-Theorie“ und ihrer über zehnjährigen Suche nach einem besonders stabilen und wärmeisolierenden magnetischen Käfig.

Die Magnete für Wendelstein werden aus supraleitenden Stromkabeln gewickelt statt wie bisher aus Kupferdraht. Auf tiefe Temperaturen abgekühlt, verbrauchen sie kaum Energie. „Speziell für Wendelstein 7-X haben wir ein flexibles supraleitendes Kabel aus Niob-Titan mit Aluminiumhülle entwickelt“, erläutert Dr. Manfred Wanner, der als Leiter der Abteilung „Basismaschine“ für den Bau der Komponenten verantwortlich ist. „Der große Vorteil: Im weichen Ausgangszustand kann es in Formen eingelegt und dann durch Erwärmen ausgehärtet werden.“ Im Betrieb wird es mit flüssigem Helium, das im Inneren fließt, auf Supraleitungstemperatur von 3,4 Kelvin bis nahe an den absoluten Nullpunkt abgekühlt.

Wendelstein 7-X im Schema: im Inneren das Plasmagefäß, auf das die Magnetspulen (blau) aufgefädelt sind, umhüllt durch die äußere Kryostat-Hülle. Zahlreiche Stützen (grün) führen durch den kalten Spulenbereich.

Grafik: IPP



IPP

Aus insgesamt 50 Kilometern Kabel entstehen beim deutsch-italienischen Konsortium Babcock Noell Nuclear/Ansaldo in Zeitz, Augsburg und Genua die Spulen. Um die Sollform innerhalb weniger Millimeter einzuhalten, müssen die Leiterwindungen sehr präzise in ihre Wickelform gepresst werden. Zur elektrischen Isolation wird der Leiter mit Glasfaserbändern umwunden, das gesamte Wickelpaket mit Epoxidharz versteift und schließlich in massive Stahlgehäuse eingeschweißt.

Fusionsexperiment Typ Tokamak



Dieses Prinzip, die Plasmen magnetisch einzuschließen, ist weltweit am besten erforscht. Tokamaks bauen einen Teil des Magnetfeldes durch einen im Plasma fließenden Strom auf, den ein Transformator pulsweise darin erzeugt. Tokamaks können deshalb ohne Zusatzmaßnahmen nur in Pulsen arbeiten. Das IPP betreibt in Garching den ASDEX Upgrade nach dem Tokamak-Prinzip. Das europäische Gemeinschaftsexperiment JET und der internationale Testreaktor ITER, über dessen Bau in diesen Tagen entschieden wird, gehören ebenfalls in diese Bauklasse. ■

Fusionsexperiment Typ Stellarator



Der große Vorteil des Stellarators gegenüber dem Tokamak ist die Fähigkeit zum Dauerbetrieb. In Stellaratoren entsteht der „magnetische Käfig“ ohne Plasmastrom allein durch Magnetspulen außerhalb des Plasmabereichs. Mit „Wendelstein 7-X“ wird im IPP-Teilinstitut Greifswald das weltweit größte und am weitesten fortgeschrittene Experiment dieses Typs realisiert. ■

Bizarre

Formen in Stahl

Bereits Ende letzten Jahres lieferte die MAN DWE in Deggendorf die ersten zwei der insgesamt 20 Sektoren des Plasmagefäßes nach Greifswald. Zu einem verwundenen Ring mit rund zwölf Metern Durchmesser zusammengesetzt, folgt die Gefäßform millimetergenau dem gewundenen Plasmanschlauch. Um die eigenwillige Form in Stahl nachzubilden, besteht das Gefäß aus 200 einzelnen Ringen. Jeder Ring wird aus mehreren fingerdicken und handbreiten Stahlblechstreifen zusammengesetzt, welche die geschwungenen Konturen nachformen. Vier der 20 Sektoren sind bislang auf diese Weise entstanden.

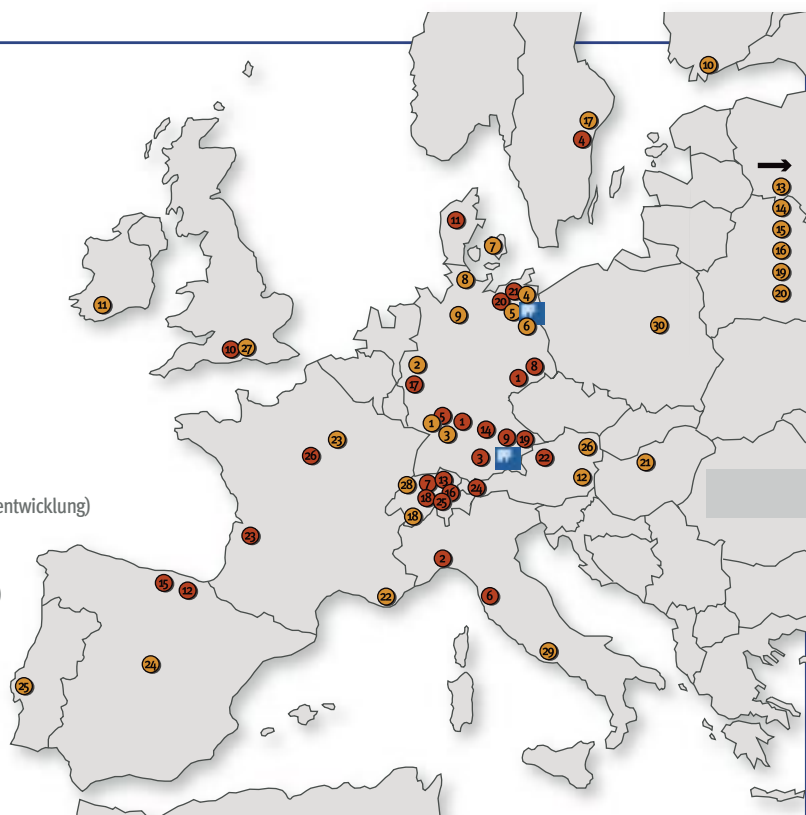
Später wird eine Hülle mit 15 Metern Durchmesser das Plasmagefäß umschließen, in der das gesamte Spulensystem untergebracht ist: Der Raum zwischen Plasma- und Außengefäß wird luftleer gepumpt und in Superisulationsfolie eingepackt. Eine Kälteanlage wird die Magnete dort auf Supraleitungstemperatur kühlen. Damit das

Fortsetzung auf Seite 62

Firmen in ganz Europa stellen die einzelnen Komponenten für Wendelstein 7-X her, zahlreiche Forschungseinrichtungen tragen zum Aufbau der Anlage bei. ■

Forschungseinrichtungen:

- 1 Forschungszentrum Karlsruhe (Gyrotron-Entwicklung)
- 2 Forschungszentrum Jülich (Spulenverbindungen, Materialtests, Diagnostikentwicklung)
- 3 Universität Stuttgart (Mikrowellen-Übertragungssystem)
- 4 Universität Greifswald (Kinetik partiell ionisierter Plasmen)
Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik, Greifswald (Elektronenkinetik)
- 5 Universität Rostock
(FE- und Wirbelstromberechnungen, Werkstoffprüfungen)
- 6 Fachhochschule Neubrandenburg (Vermessungsaufgaben)
- 7 RISØ, Roskilde/Dänemark (Modellierung von Plasmaturbulenzen)
- 8 Universität Kiel (Sondenentwicklung, Turbulenzforschung)
- 9 Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (Spektroskopie, Neutronenflussmessung)
- 10 University of Technology, Helsinki/Finnland (Diagnostikentwicklung)
- 11 Universität Cork/Irland (Schnelle Dateninterpretationstechniken)
- 12 Universität Graz/Österreich (Kinetische Theorie)
- 13 Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod/Russland
(Kollektive Thomson-Streuung)
- 14 IOFFE Institute, St. Petersburg/Russland (Neutralteilchen-Analyse)
State Technical University, St. Petersburg/Russland
(Verunreinigungspellet-Injektion)
Efremov Institute, St. Petersburg/Russland (Festigkeitsberechnung)
- 15 Kurchatov Institute, Moskau/Russland
(Theorie optimierter Stellaratoren)
- 16 Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk/Russland
(Entwicklung Diagnostikinjektor)
- 17 Alfvén-Labor, Stockholm/Schweden
(Entwicklung der Neutronen-Diagnostik)
- 18 CRPP, Lausanne/Schweiz (Magnetische Einschlusskonzepte)
- 19 Institute of Physics, Kharkov/Ukraine (Fokker-Planck-Code)
Karazin National University, Kharkov/Ukraine (Ionenverunreinigungstransport)
- 20 Scientific Centre Kiev/Ukraine (Schnelle Ionen in toroidalen Fusionsanlagen)
- 21 KFKI Budapest/Ungarn (Lithiumstrahl-Diagnostik)
- 22 CEA Cadarache/Frankreich
(Mikrowellentechnologie, wärmebelastete Komponenten)
- 23 CEA Saclay/Frankreich (Test der supraleitenden Spulen)
- 24 CIEMAT, Madrid/Spainien (Kinetische Theorie, Industriebetreuung)
- 25 IST, Lissabon/Portugal (Diagnostik und Datenerfassung)
- 26 Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Wien
(Betreuung der Spulenfertigung)
- 27 UKAEA, Culham/Großbritannien (Vermessungsaufgaben)
- 28 Paul-Scherrer Institut, Villigen/Schweiz (Test von Spulenverbindungen)
- 29 ENEA, Rom/Italien (Ingenieurtechnische Unterstützung)
- 30 Technische Universität Warschau/Polen (Strukturmechanische Berechnungen)



Industrieunternehmen:

- 1 BNN, Würzburg und Zeitz (Nichtplanare Spulen, Regelspulen)
- 2 Ansaldo, Genua/Italien (Nichtplanare Spulen: Wickelpakete)
- 3 ABB, Augsburg (Nichtplanare Spulen: Wickelpakete)
- 4 Oesterby, Oesterbybruck/Schweden (Gehäuse der nichtplanaren Spulen)
- 5 EAS, Hanau (Supraleiter)
- 6 Outokumpu, Fornaci di Barga/Italien (Supraleiter)
- 7 Alu Menziken, Menziken/Schweiz (Supraleiter)
- 8 PEM, Schwarzenberg (Spulenbearbeitung)
- 9 C-Con, Rottenburg an der Laaber (Spul Vermessung)
- 10 Tesla, Storrington/Großbritannien (Ebene Spulen)
- 11 Erik Roug A/S, Herning/Dänemark (Heliumspeicher)
- 12 JEMA, Lasarte-Oria/Spainien (Stromversorgung der Regelspulen)
- 13 Thales, Turgi/Schweiz (Hochspannungsgleichstrom-Versorgungsanlage)
- 14 Siemens, Erlangen (Hochspannungsgleichstrom-Versorgungsanlage)
- 15 ENSA, Maliano/Spainien (Stütz- und Tragstruktur)
- 16 ABB, Turgi/Schweiz (Stromversorgung der Magnetspulen)
- 17 Messer Griesheim, Krefeld (Speichertanks für Flüssigstickstoff und -helium)
- 18 Romabau, Weinfelden/Schweiz (Gefäßstützen)
- 19 MAN-DWE, Deggendorf
(Plasma- und Außengefäß, thermische Isolation, Wandauskleidung)
- 20 RST, Rostock (Spulenauffädeleinheit)
- 21 AKB, Greifswald (Montagestand II)
- 22 SAS, Linz/Österreich (Vormontagestände Ia/Ib)
- 23 Snecma Moteurs, Le Haillan Cedex/Frankreich (Faserverstärkter Kohlenstoff)
- 24 Plansee, Reutte/Österreich (Targetelemente)
- 25 Linde Kryotechnik, Pfungen/Schweiz (Heliumkälteanlage)
- 26 Thales, Velizy/Frankreich (Gyrotrons)



Plasma im Innern beobachtet und geheizt werden kann, besitzen Innen- und Außengefäß zahlreiche Öffnungen: „Knapp 300 war das Maximum; mehr Löcher konnten wir den Physikern nicht zugestehen“, erklärt Dr. Wanner. Denn für jedes Loch muss ein Stutzen wärmeisoliert zwischen den Spulen hindurchgeführt werden, um die Öffnungen im Plasmagefäß vakuumdicht mit der Außenhülle zu verbinden.

Die Aufgabe, das Plasma zu heizen, werden später hauptsächlich zehn Mikrowellensender übernehmen – so genannte Gyrotrons. Sie pumpen

Mikrowellen im Dauerbetrieb in das Plasma. Das Forschungszentrum Karlsruhe hat die Gesamtverantwortung für das Mikrowellen-Heizsystem übernommen. Und von Karlsruhe koordiniert, hat die französische Firma Thales Electron Devices bereits ein Prototyp-Gyrotron hergestellt. Ein weiteres Gyrotron hat Communications & Power Industries in den USA gebaut. Beide sind mit 1.000 Kilowatt Leistung die leistungstärksten kontinuierlich arbeitenden Mikrowellensender weltweit.

Montagetest bestanden: In ein drehbares Gestell eingehängt, wird eine der sechs Tonnen schweren Magnetspulen über das Plasmagefäß gefädelt.

IPP



Foto: IPP

Millimeterarbeit mit sechs Tonnen

Zurzeit arbeiten die Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker in Greifswald daran, die Montage vorzubereiten. Das testweise Aufhängen einer der sechs Tonnen schweren Magnetspulen auf das Plasmagefäß, eine heikle Millimeterarbeit, hat bereits reibungslos geklappt.

Professor Wagner ist optimistisch: „Erstmals wird die Einschluss-Qualität der eines Tokamak ebenbürtig. Wendelstein 7-X soll zeigen, dass auch Stellaratoren kraftwerkstauglich sind.“ Und mit 30 Minuten langen Entladungen soll er ihr wesentliches Plus vorführen: den Dauerbetrieb.

Entscheidend für den 2010 geplanten Betriebsbeginn: Alle Bauteile müssen termingerecht fertig werden. „Bei so komplexen Anlagen ist bereits die industrielle Fertigung und der Aufbau ein Experiment für sich. In zahlreichen Sparten betreten wir Neuland“, erläutert Dr. Wanner. Doch die Mühe zahlt sich doppelt aus, denn „die mit Wendelstein 7-X gewonnenen Erfahrungen, vor allem bei der Supraleitung, werden auch für den internationalen Testreaktor ITER von großem Nutzen sein.“

Isabella Milch

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Garching / Greifswald