

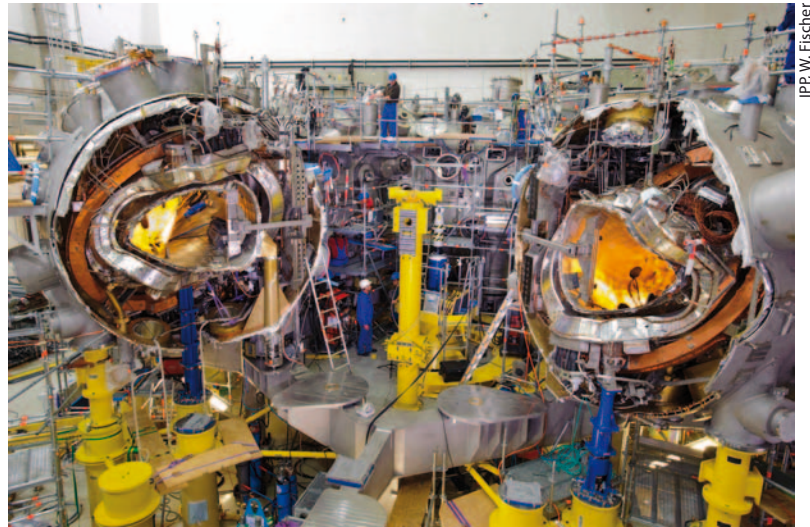
Ein komplexes Feld

Am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald entsteht das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X vom Typ Stellarator.

Stefan Jorda

Ungewöhnlich ist sie, diese Maschine. Wären da nicht die vielen Löcher in dem matt schimmernden Stahl, kleine und große, runde und rechteckige, könnte das Ganze ein enormer Tank sein. Die Löcher geben den Blick frei auf ein komplexes Inneres aus Metallplatten, kupfernen und silbrig glänzenden Strukturen, Schläuchen, Rohren und elektrischen Leitungen. Ein Baugerüst führt in fünf Meter Höhe. Hier oben zeigt sich, dass der „Tank“ die Form eines riesigen Torus hat. In seinem Inneren verbirgt sich eines der weltweit größten und komplexesten Experimente der Fusionsforschung: Wendelstein 7-X, ein sog. Stellarator. In der großen Experimentierhalle des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP) in Greifswald nähert sich das 725 Tonnen schwere Großgerät der Zielgeraden: Rund dreißig Jahre nach den ersten Plänen soll der Aufbau Mitte 2014 abgeschlossen sein. Dann muss sich in der anschließenden Experimentierphase zeigen, ob ein Stellarator das Potenzial für ein Kraftwerk hat, das wie die Sonne schier grenzenlose Energie aus der Verschmelzung von Atomkernen erzeugt.¹⁾

Die Crux bei allen Fusionsexperimenten besteht darin, das 100 Millionen Grad heiße Plasma, in dem die Fusionsreaktionen stattfinden, mit Magnetfeldern so einzuschließen, dass es mit dem ringförmigen Plasmagefäß nicht in Berührung kommt. Wie diese Felder erzeugt werden, darin unterscheiden sich die beiden grundsätzlich unterschiedlichen Konzepte für Fusionsexperimente: Beim Stellarator legen äußere Spulen das komplette Feld fest. „Er ist de facto eine magnetische Flasche, in die Sie Plasma füllen“, erläutert Thomas Klinger, Fusionsforscher und Projektleiter von Wendelstein



Bis Mitte November standen erst vier von fünf Modulen des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X an der endgültigen Position. Im Querschnitt sind das

zentrale Plasmagefäß, die silbrig bzw. kupfern glänzenden Magnetspulen sowie der stählerne Außentank mit seinen rund 500 Öffnungen zu erkennen.

7-X, „wobei die ganze Intelligenz in der Geometrie des Feldes steckt.“ Im Gegensatz dazu entsteht das Feld bei den meisten Anlagen, den im südfranzösischen Cadarache im Bau befindlichen ITER eingeschlossen, sowohl durch äußere Spulen als auch durch einen Strom im Plasma selbst. Wie bei einem Transformator, dessen Sekundärspule das Plasma ist, wird dieser Strom von außen induziert. Daher eignet sich ein solcher Tokamak nicht für den Dauerbetrieb, und es ist eine große Kunst, ihn „hochzufahren“: Der Plasmaeinschluss entsteht erst sukzessive durch die richtigen Stromprofile, und ein Strom lässt sich nur in einem vorhandenen Plasma induzieren. „Das ist eine typische Selbstkonsistenzschleife“, erklärt Thomas Klinger: „Das System zieht sich wie der Baron Münchhausen selbst aus dem Sumpf.“ Ein großer Vorteil macht all dies jedoch wett: Die Anlage hat die einfache Form eines Donuts.

Zum Erfolg des Tokamaks hat auch beigetragen, dass bei den ersten Stellaratoren die „Flasche“

nicht „dicht“ war, das Plasma also nicht ausreichend lang eingeschlossen blieb. Daher lies das Interesse an diesem Prinzip über viele Jahre nach. Theoretikern in Garching hat dies jedoch keine Ruhe gelassen, und sie haben sich die Frage gestellt, wie das Feld für einen möglichst guten Einschluss ausschauen müsste. Der radikale Schritt bestand darin, sich von getrennten ebenen Spulen für die Feldkomponenten zu verabschieden und stattdessen gekrümmte Spulen zu verwenden, die das gesamte Feld erzeugen. Mit den leistungsfähigsten Computern berechneten die Theoretiker vor über zwanzig Jahren iterativ das beste Magnetfeld sowie die zugehörigen Spulen und zeigten, dass dieser optimierte Stellarator einen Plasmaeinschluss ermöglichen sollte, der mit dem Tokamak vergleichbar ist. Der Preis dafür besteht allerdings darin, dass das Plasmagefäß und die Spulen sehr kompliziert geformt sein müssen.

Diese Ideen wurden mit dem Experiment Wendelstein 7-AS bis 2002 in kleinem Maßstab erfolg-

1) vgl. F. Wagner, Auf den Wegen zum Fusionskraftwerk, Physik Journal, August/September 2009, S. 35

reich getestet, und zwar in Garching, am Hauptsitz des IPP. Für das Nachfolgeexperiment, das wie ITER supraleitende Spulen verwendet, fiel die Standortwahl aus politischen Gründen auf Greifswald. „Das ist ein Wendekind“, erinnert sich Thomas Klinger: „Politisches Hickhack und unglaubliche Zufälle haben zu dieser Entscheidung geführt.“ So kommt es, dass ein Großgerät, das nach einem bayrischen Berg benannt ist, an der Ostsee steht, wo es kaum weiter von den Bergen entfernt sein könnte. Wohl auch deswegen wollten nur wenige Wissenschaftler von Garching nach Greifswald umziehen, sodass dort ein neues junges Team aus inzwischen 450 Mitarbeitern aufgebaut werden musste. Dennoch arbeiten die Wissenschaftler an beiden Standorten eng zusammen, einige Projektgruppen sitzen komplett in Garching. Videokonferenzen ersetzen soweit wie möglich die Zwei-Tages-Reisen zwischen Mecklenburg-Vorpommern und Bayern.

Technisches Neuland

Bis Anfang November entstand in der Vormontagehalle aus unzähligen Bauteilen das letzte von fünf nahezu identischen Modulen. Jedes wiegt rund hundert Tonnen. Das Herzstück ist das stählerne Plasmagefäß, dessen Querschnitt zwischen dreieckig und bohnenförmig variiert. In Millimeterarbeit wurden darauf zehn silbrig glänzende und bizarr geformte supraleitende Spulen „gefädelt“. Rohre für das tiefkalte Helium laufen wie ein Blutssystem kreuz und quer durch das Modul, endlose Meter elektrischer Leitungen führen zu Sensoren im Inneren. Die Verbindungen zwischen supraleitenden Kabeln sind besonders kritisch, um einen Unfall wie bei der Inbetriebnahme des Large Hadron Colliders 2008 ausschließen zu können. „Daher ist das Verbinden Handarbeit, und jeder Schritt ist penibel vorgegeben“, erläutert Lutz Wegener, der für die gesamte Montage verantwortlich ist.

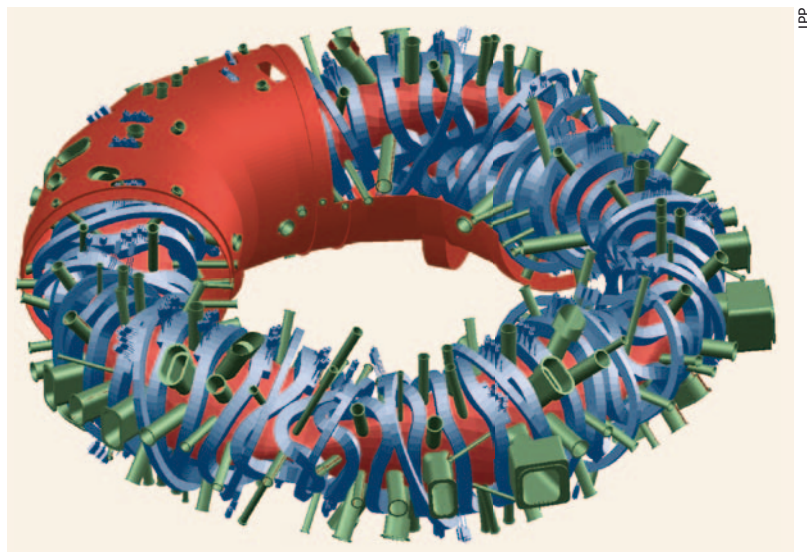
Der studierte Automatisierungs- und Elektrotechniker hat früher europaweit den Aufbau von Fertigungsstandorten geleitet und dabei Erfahrungen mit dem Anlagenbau im großen Stil gesammelt. Die technische Komplexität von Wendelstein 7-X war aber auch für ihn Neuland. „Anlagenbau auf engstem Raum finden Sie auch bei U-Booten“, sagt er, „aber hier ballen sich Hochvakuum- und Tieftemperaturtechnik mit enormen elektromechanischen und geometrischen Anforderungen.“ So herrschen im Plasmagefäß während des Betriebs ein Hochvakuum und Temperaturen von 100 Millionen Grad. In unmittelbarer Nähe davon arbeiten die kalten supraleitenden Spulen, die sich zur Wärmeisolierung in einem zweiten Vakuumsystem befinden. In den Spulen fließen Ströme von 18 000 Ampere, und das gesamte System muss hochspannungsfest sein. Mehrere Kilovolt würden in der Anlage auftreten, falls ein Supraleiter unerwartet in den normalleitenden Zustand übergeht. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass man den Bauteilen nicht ansieht, ob sie korrekt geformt bzw. montiert sind. „Im normalen Anlagenbau würde kein Mensch so etwas machen.“, ist Wegener überzeugt, doch gerade diese Komplexität findet er „absolut faszinierend“ – auch wenn sie mit zahlreichen Problemen einhergeht,



Thomas Klinger, Projektleiter von Wendelstein 7-X, erläutert neben der Skulptur „Energie“ die komplexe Geometrie der Anlage.

die das gesamte Projekt wiederholt verzögert haben.

Beim offiziellen Projektstart 1996 war die Inbetriebnahme für 2006 angepeilt. Dies erwies sich jedoch als viel zu optimistisch angesichts der Tatsache, dass die Anlage „extrem prototypisch“ ist, wie Klinger betont: „Wir machen einen gewaltigen technischen Sprung, mit dem zwangsläufig auch Risiken verbunden sind.“ So gab es bereits früh Probleme mit den supraleitenden Spulen, die ein Industriekonsortium hergestellt hat. Trotz des Massenmarkts mit Magneten für die Kernspintomographie sei die Supraleitung eine schwierige, anspruchsvolle Technologie, sobald man von den Standards abweiche. Bei den wochenlangen Tests für jede einzelne Spule sind denn auch



Diese Computergrafik zeigt das Plasmagefäß im Inneren (rot), die 70 Magnetspulen (blau) sowie den Außentank (rot).

Die Stützen (grün) erlauben den Zugang ins Maschineninnere für die Versorgung sowie die Experimentiereinrichtungen.



IPP, A. Richter, Ullmann
Er kennt Wendelstein 7-X in- und auswendig: Lutz Wegener ist verantwortlich für die gesamte Montage.

einige mehrfach durchgefallen. Die hohen Anforderungen an die Hochspannungsfestigkeit oder Heliumdichtheit – allein für die Heliumrohre waren 5000 Schweißnähte nötig – waren für weitere Verzögerungen verantwortlich. „Sie müssen eine Prognose über Zeit und Aufwand machen für einen Arbeitsschritt, der in fünf Jahren stattfindet und für den die Konstruktion noch nicht fertig ist.“, beschreibt Wegener das Dilemma. Im Jahr 2007 haben die Verantwortlichen Bilanz gezogen und sich auf einen neuen Zeit- und Kostenplan „eingeschworen“, der seither strikt eingehalten wird.

Ein riesiger Deckenkran hat Mitte November das fünfte Modul an seinen endgültigen Platz bugsirt und kurz vor Weihnachten den zugehörigen Deckel aufgesetzt.²⁾ Noch sind aber viele der rund 500 Löcher in der Außenhülle, deren

Durchmesser 16 Meter beträgt, offen. Sie nehmen Stützen auf, die den Zugang zum Inneren der Maschine erlauben. Rund die Hälfte davon geht sogar bis ins Plasmagefäß und dient der Versorgung mit Strom, Helium oder Kühlwasser für die Plasmawand. Andere Stützen sind notwendig, um später das Plasma zu heizen, entweder durch das Einschleusen von neutralem Wasserstoff oder das Einstrahlen von 10 Megawatt an Mikrowellenleistung – das entspricht 10 000 Haushaltsmikrowellenöfen, deren Leistung sich im Volumen einer Praline deponieren lässt. Schließlich sind natürlich auch Zugänge vorgesehen, um das Plasma mit den unterschiedlichsten Messgeräten zu untersuchen. Das millimetergenaue Einschweißen dieser bis zu drei Meter langen Rohre, die das Kryovakuum der Magnete durchqueren und daher wärmeisoliert und vakuumdicht sein müssen, war eine besondere Herausforderung: Mehr als einmal musste eine fehlerhafte Schweißnaht wochenlang von Hand wieder weggefräst werden. „Aber nach zwei Modulen wussten wir genau, wie wir’s machen müssen“, erinnert sich Wegener, „und heute können wir das jederzeit zuverlässig wiederholen.“

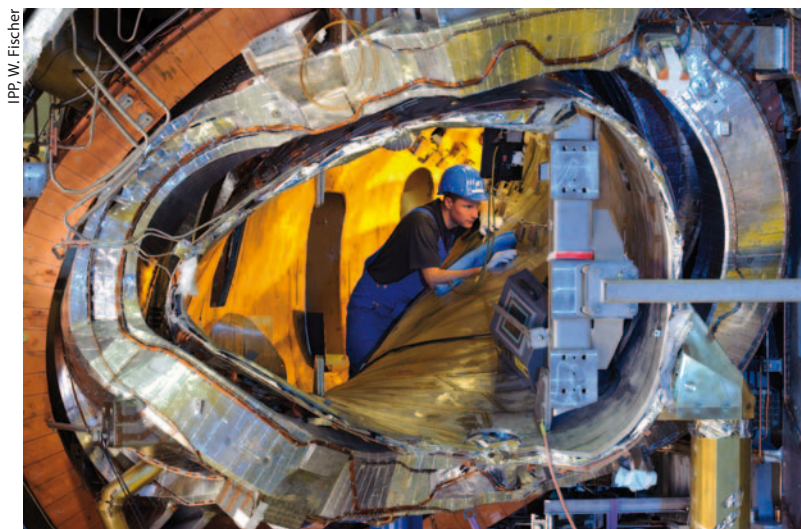
Über eine Luke hat ein Scherzbold eine Zeichnung von Wilhelm Busch gehängt. Sie zeigt den Meister Bäcker, der Max und Moritz in den Ofen schiebt, nachdem sie in

den Teig gefallen sind. Statt in den Backofen führt ein waagrechter Rollschlitten in das Innere der Fusionsanlage. Jedes Modul hat einen solchen Personenzugang, an denen in den nächsten Jahren ein reger Verkehr herrschen wird, um die „Inneneinrichtung“ anzubringen. Dazu gehören 2500 bis zu hundert Kilogramm schwere Bauteile, die sehr genau an die Innenwände des Plasmagefäßes geschraubt werden müssen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der inneren Auskleidung zu, die aus Edelstahlpaneelen sowie Kohlenstoffkacheln an thermisch besonders belasteten Stellen besteht. Diese „erste Wand“ muss einerseits den enormen Belastungen standhalten, darf dabei das Plasma aber auch nicht kontaminieren – zwei durchaus gegensätzliche Anforderungen. Der Hitzeschild eines Space Shuttles muss beim Wiedereintritt in die Atmosphäre ähnliche Belastungen aushalten, erklärt Robert Wolf, der den Bereich Physik des Projekts leitet: „Allerdings interessiert es niemanden, ob die Erdatmosphäre dabei kontaminiert wird, solange das Shuttle geschützt ist.“

Viele Fragen

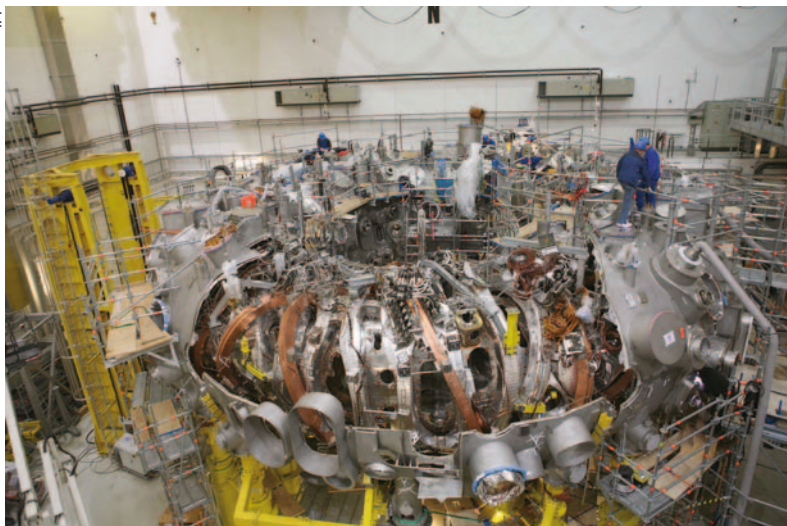
In der Experimentierphase ab 2014 werden die Fusionsforscher in dem 30 Kubikmeter großen Plasmavolumen aus wenigen Milligramm Wasserstoff oder Deuterium ein heißes Plasma erzeugen. Die Dauer der Entladung soll von zunächst einigen zehn Sekunden bis auf eine halbe Stunde ab 2019 anwachsen. Aufgrund ihrer engen Wechselwirkung miteinander ist aber nicht nur das Plasma, sondern auch die Anlage selbst Forschungsgegenstand. „Dies ist anders als zum Beispiel in der Teilchenphysik, wo ein Beschleuniger energiereiche Teilchen liefert, dabei aber nicht selbst Untersuchungsgegenstand ist“, sagt Wolf. Bei Wendelstein 7-X gibt es viele Fragen zu klären im Hinblick darauf, ob sich der Stellarator für ein Kraftwerk eignet. Essenziell dafür ist der Nachweis, dass sich das Plasma wirklich so gut

2) Ein Film, der die Montage von Oktober 2009 bis Mai 2011 im Zeitraffer zeigt, ist unter www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/filme/zeitraffer_w7x/ zu finden.



IPP, W. Fischer
Das Plasmagefäß, dessen Querschnitt sich ändert, ist „begehbar“. Neben den nicht-planaren Spulen (silbrig-glänzend)

erlauben zusätzliche planare Spulen (kupferfarben) noch eine gewisse Variation des Magnetfelds.



Mitte November wurde das letzte Fünftel des Fusionsexperiments an seinen Platz gesetzt (vorne). Der in dieser Aufnahme

noch fehlende Deckel der Stahlhülle folgte kurz vor Weihnachten.

wie erwartet einschließen lässt. Das Forschungsprogramm umfasst auch Fragen zur Heizung oder zum Abtransport der „Asche“, die bei einer Fusionsreaktion übrigbleibt. Dabei ist Wendelstein 7-X allerdings nicht dafür ausgelegt, wie ITER ein energieverstärkendes Plasma zu liefern – dafür ist die Anlage trotz der beeindruckenden Größe noch deutlich zu klein. Im Gegensatz zu ITER wird Wendelstein 7-X daher auch nicht als nukleare Anlage mit Tritium betrieben.

Während ITER „International“ bereits im Namen trägt, ist Wendelstein 7-X mehr ein nationales Projekt mit signifikanter Unterstützung aus dem europäischen Fusionsprogramm: Von den Gesamtkosten – rund eine Milliarde Euro, die sich je zur Hälfte auf Maschine und Betriebskosten aufteilen – übernimmt Deutschland 75 Prozent. „Es wäre aber provinziell zu sagen, das ist unsere Maschine“, sagt Thomas Klinger, der sich sicher ist, dass Forscher aus der ganzen Welt nach Greifswald kommen werden. Das Interesse an der Fusionsforschung ist weltweit jedenfalls groß, insbesondere in Asien: In Korea gibt es ein eigenes Gesetz für die Förderung, China hat praktisch im Alleingang einen supraleitenden Tokamak gebaut und wartet möglicherweise gar nicht auf Ergebnisse von ITER. Angesichts der Tatsache, dass der Bedarf an elektrischer Energie bis 2100 um einen Faktor

vier bis sechs steigen wird, lässt Klinger keine Zweifel daran aufkommen, dass dieses Interesse gerechtfertigt ist und dass die Fusion auch trotz der jetzt anstehenden Energiewende nicht zu spät kommen würde.

Erfüllt Wendelstein 7-X die Erwartungen, dann würde das nächste Ziel darin bestehen, direkt oder über eine Zwischenstufe auf die Größe eines Kraftwerks zu extrapolieren. Der Fahrplan der Fusionsforschung sieht um die Mitte des Jahrhunderts ein Demonstrationskraftwerk DEMO vor. Thomas Klinger ist überzeugt davon, dass weltweit gleich mehrere Kraftwerke gebaut werden müssten, womöglich sowohl Tokamaks als auch Stellaratoren, denn: „Nicolaus Otto und Rudolf Diesel haben sich ja auch nicht zusammengesetzt und auf einen Motor geeinigt. Beide Motorentypen gibt es bis heute.“