

Sonnenfeuer im Labor

Wo steht die Fusionsforschung?



Ein energielieferndes Fusionsfeuer soll der internationale Experimentalreaktor ITER erzeugen. Die Großanlage, die demnächst im französischen Cadarache gebaut wird, bündelt die Kenntnisse der weltweiten Fusionsforschung in einem gemeinsamen Projekt. Parallel soll das in Greifswald entstehende Experiment »Wendelstein 7-X« die Kraftwerkstauglichkeit eines alternativen Bauprinzips testen. **Von Isabella Milch**

Der internationale Experimentalreaktor ITER (lat.: der Weg) ist der nächste große Schritt der weltweiten Fusionsforschung. Die Anlage soll zeigen, dass ein energielieferndes Fusionsfeuer unter kraftwerksähnlichen Bedingungen möglich ist. Den Vertrag zur Gründung der für den Bau und Betrieb verantwortlichen ITER-Organisation haben Ende November 2006 in Paris Vertreter der sieben ITER-Partner – Europa, Japan, Russland, die USA, China, Indien und Südkorea – unterzeichnet. Nach zehn Jahren Bauzeit soll die Anlage anlaufen und dann zwanzig Jahre lang neue Erkenntnisse liefern, die den Bau eines Fusionskraftwerks ermöglichen.

FUSIONSBEDINGUNGEN. Die Energiequelle von Sonne und Sternen auf der Erde nutzbar zu machen, ist das Ziel der Fusionsforschung. Ein Fusionskraftwerk soll aus der Verschmelzung von Atomkernen Energie gewinnen. Unter irdischen Bedingungen gelingt dies am einfachsten mit den beiden Wasserstoffsorten Deuterium und Tritium. Sie verschmelzen zu Helium, dabei werden Neutronen frei sowie große Mengen von Energie: Ein Gramm Brennstoff könnte in einem Kraftwerk 90.000 Kilowattstunden Energie freisetzen, die Verbrennungswärme von elf Tonnen Kohle. Die für den Fusionsprozess nötigen Grundstoffe – Deuterium und Lithium, aus denen im Kraftwerk Tritium hergestellt wird – sind in nahezu unerschöpflicher Menge überall auf der Welt vorhanden.

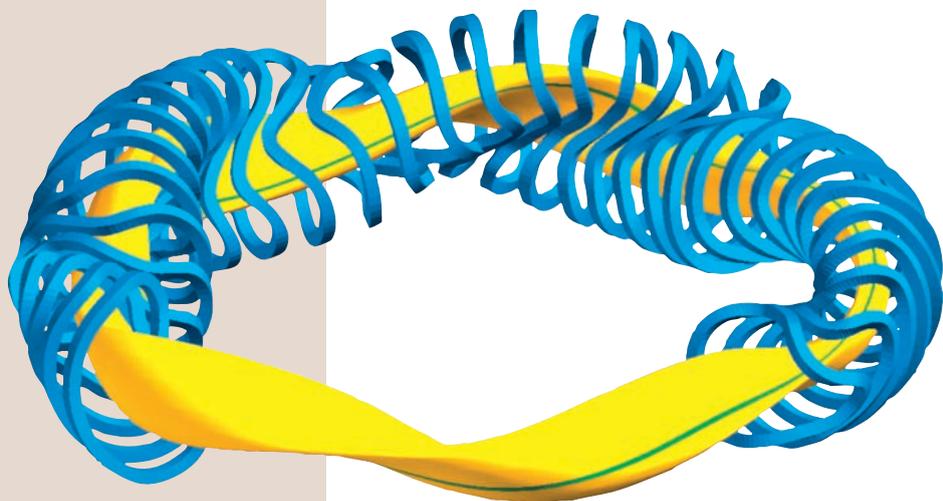
Wie ein Kohlefeuer setzt auch das Fusionsfeuer nicht selbständig, sondern erst bei den passenden Zündbedingungen ein. Für den Brennstoff – ein sehr dünnes, ionisiertes Gas, ein »Plasma« – bedeutet dies eine Zündtemperatur von 100 Millionen Grad. Wegen dieser hohen Temperatur kann man das Plasma nicht unmittelbar in materiellen Gefäßen einschließen. Bei jedem Wandkontakt würde sich das heiße Gas sofort abkühlen. Stattdessen nutzt man magnetische Felder, die den Brennstoff wärmeisolierend umgeben und von den Gefäßwänden fernhalten.

Nach diesem Prinzip Energie freizusetzen, gelang erstmals der europäischen Gemeinschaftsanlage JET (Joint European Torus) in Culham/Großbritannien, dem gegenwärtig

Tokamak: Die sowjetischen Physiker Andrei Sacharow und Igor Jewgenjewitsch Tamm haben diesen Reaktortyp 1952 entwickelt. Mit Tokamak-Anlagen konnte bereits Kernfusion erreicht werden, jedoch ist es bisher nicht gelungen, dadurch mehr Energie zu erzeugen, als eingesetzt wurde.

größten Fusionsexperiment weltweit. Es wurde von den europäischen Fusionsforschern gemeinsam geplant, gebaut und wird seit 1983 auch gemeinsam betrieben. Alle wissenschaftlich-technischen Ziele, die der Anlage bei der Planung gesetzt wurden, sind inzwischen erreicht oder sogar übertroffen. 1997 ist es hier gelungen, kurzzeitig eine Fusionsleistung von 16 Megawatt zu erzeugen. Mehr als die Hälfte der zur Plasmaheizung verbrauchten Leistung wurde dabei per Fusion zurückgewonnen. Für einen Nettogewinn an Energie ist das JET-Plasma mit seinen 80 Kubikmetern Volumen jedoch zu klein. Dies ist die Aufgabe des internationalen Experimentalreaktors ITER. In seinem rund 830 Kubikmeter umfassenden Plasmavolumen soll eine Fusionsleistung von 500 Megawatt erzeugt werden – zehnmal mehr, als zur Aufheizung des Plasmas verbraucht wird.

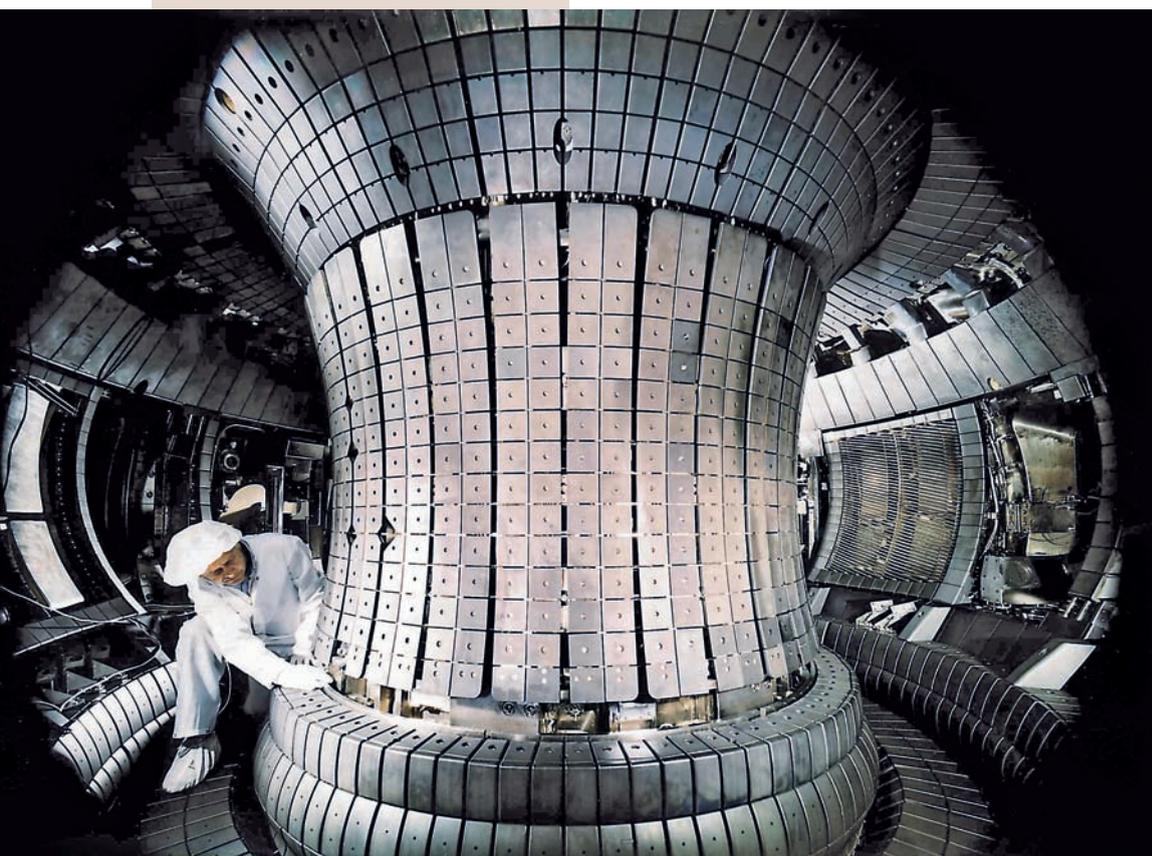
WEIT VERBREITET: TOKAMAK-ANLAGEN. JET und ITER sind Fusionsanlagen vom Typ »Tokamak«, der heute weltweit am weitesten



Plasma und Magnetspulen des Stellarators Wendelstein 7-X, der zurzeit im Greifswalder Teilinstitut des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik aufgebaut wird.

Bild links: Herstellung des Plasmagefäßes für Wendelstein 7-X.

verbreiteten und am besten untersuchten Bauart. Sie bauen ihren Magnetfeldkäfig zum einen Teil durch äußere Magnetspulen auf, die das Plasmagefäß umschließen. Den anderen Teil erzeugt ein im Plasma fließender elektrischer Strom, der dort pulsweise von einem Transformator induziert wird. Letzteres hat zur Folge, dass Tokamaks ohne Zusatzmaßnahmen nur in Pulsen arbeiten können. Im Europäischen Fusionsprogramm wird an mehreren, unterschiedlich spezialisierten To-



Blick in das Plasmagefäß der Fusionsanlage ASDEX Upgrade im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, der größten deutschen Fusionsanlage.

GLÄNZENDE AUSSICHTEN. Zur Optimierung des ITER-Betriebs beschäftigt sich ASDEX Upgrade zum Beispiel damit, Plasmazustände zu entwickeln, die möglichst gute Wärmeisolation mit langer Pulslänge verbinden. Ein Beispiel ist das »verbesserte High-Confinement-Regime«, kurz »verbessertes H-Regime«, eine Betriebsweise mit besonders hohem Energieinhalt des Plasmas. Vor einigen Jahren fanden Wissenschaftler an ASDEX Upgrade heraus, dass sich durch spezielle Formung des Stromprofils ein Zustand mit verbesserten Energieeinschluss- und Stabilitätseigenschaften erreichen lässt. Entsprechend fand der neue Plasmazustand großes Interesse. Denn je höher man den Energieinhalt des Plasmas und damit die Fusionsausbeute treiben kann, desto kleiner und damit kostengünstiger wird ein späteres Kraftwerk.

In den folgenden Jahren gelang es an ASDEX Upgrade, das »Verbesserte H-Regime« über einen immer breiteren Arbeitsbereich einzustellen. Dazu muss man dem Plasmastrom, der einen Teil des magnetischen Käfigs erzeugt, von Anfang an den richtigen Weg im Plasma bahnen. Für diesen »Stromtrieb« nutzt man die sogenannte Neutralteilchen-Heizung. Durch Einschleusen schneller Wasserstoffatome lässt sich das Plasma auf die hohen Fusionstemperaturen aufheizen. Ebenso lässt sich aber auch ein elektrischer Strom im Plasma erzeugen und von außen steuern. Richtig begonnen, bleibt das beim Starten der Entladung geformte Stromprofil durch komplexe Rückkopplungen zwischen Plasma und Magnetfeld über die ganze Entladung stabil.

Nach den Erfolgen an ASDEX Upgrade konnten auch das ähnlich aufgebaute Fusionsexperiment DIII-D in San Diego/USA und die Großanlage JET in Culham das »Verbesserte H-Regime« erreichen. Nachdem sich der günstige Plasmazustand also auf verschiedenen Wegen in drei unterschiedlich großen Anlagen erzielen ließ, ist man zuversichtlich, dass dies auch in dem nochmals größeren ITER gelingen wird. Die zu erwartende Fusionsausbeute würde sich damit mindestens verdoppeln. Statt der angestrebten 400 Megawatt könnte ITER in dieser Betriebsweise bei sonst gleichen Bedingungen mehr als 800 Megawatt Fusionsleistung liefern.

Die Ergebnisse dienen aber auch direkt der Konzeptverbesserung des Tokamaks: Im Hinblick auf ein künftiges Kraftwerk ist es nämlich wichtig, die Anlagen vom Puls- zum Dauerbetrieb zu bringen. Dazu muss der Plasmastrom von außen getrieben werden und nicht mehr über den nur

kamaks geforscht: Während die Großanlage JET das Plasmaverhalten in der Nähe der Zündung untersucht, bearbeiten die kleineren nationalen Anlagen – ASDEX Upgrade in Garching, TEXTOR in Jülich, der mit supraleitenden Magnetspulen arbeitende Tore Supra in Cadarache, Frankreich, sowie FTU im italienischen Frascati – speziellere Fragen. Zum Beispiel widmet sich ASDEX Upgrade, die größte deutsche Fusionsanlage, schwerpunktmäßig der ITER-Vorbereitung. Hierzu gehört die Suche nach optimierten Betriebsweisen, d.h. die Entwicklung von Plasmazuständen mit verbesserter Wärmeisolation sowie die Verlängerung der Pulsdauer bis hin zum Dauerbetrieb. So werden die mit ASDEX Upgrade erarbeiteten Kenntnisse, die bereits wesentlich in die ITER-Planung eingeflossen sind, auch den wissenschaftlichen Betrieb der Anlage bestimmen.

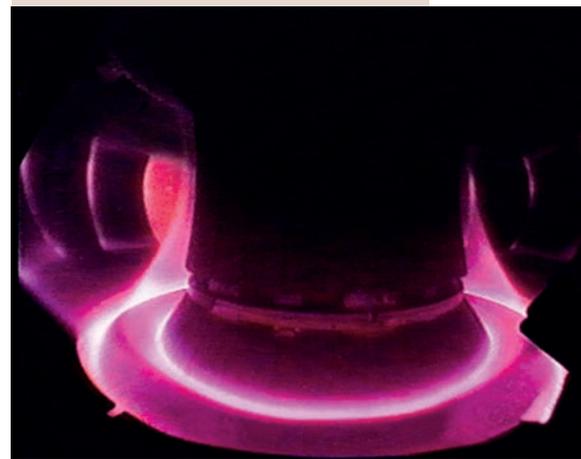
in Pulsen arbeitenden Transformator. So wurde in den Entladungen mit verbessertem H-Regime der Strom nur noch zu 50 Prozent per Transformator erzeugt; 15 Prozent trieb die Neutralteilchen-Heizung und 35 Prozent trug ein mit dem Plasmadruck verbundener Strom bei, der »Bootstrap«-Strom. Auf die beiden letzteren setzt man bei allen Versuchen, den Tokamak dauerbetriebsfähig zu machen. Wie sich dies mit anderen Erfordernissen – Stabilität, Verunreinigungs-kontrolle und Energieabfuhr – vereinen lässt, ist einer der Arbeitsschwerpunkte von ASDEX Upgrade.

DIE ALTERNATIVE: STELLARATOREN. Im Unterschied zu Tokamaks können Fusionsanlagen vom Typ »Stellarator« von vorneherein im Dauerbetrieb arbeiten: Sie werden ohne Plasmastrom mit einem Feld betrieben, das ausschließlich durch äußere Spulen erzeugt wird. Dafür benötigen sie jedoch wesentlich komplexer geformte Magnetspulen als ein Tokamak. Stellaratoren werden in Japan und den USA untersucht. In Europa wird der Stellarator TJ-II in Madrid betrieben; in Greifswald entsteht Wendelstein 7-X. Nach der Fertigstellung im Jahr 2010 wird letzterer das weltweit größte Experiment vom Stellarator-Typ sein – mit einem Plasmavolumen von 30 Kubikmetern jedoch wesentlich kleiner als ITER. Wendelstein 7-X soll die Kraftwerkstauglichkeit dieses alternativen Konzepts demonstrieren: Ein verbessertes Magnetfeld soll die Schwierigkeiten früherer Stellaratoren überwinden; die Qualität von Plasmagleichgewicht und -einschluss soll der eines Tokamak ebenbürtig werden. Und mit Entladungen bis zu 30 Minuten Länge soll Wendelstein 7-X die wesentliche Stellaratoreigenschaft vorführen, den Dauerbetrieb. Ein energielieferndes Plasma wird allerdings nicht angestrebt: Da sich dessen Eigenschaften vom Tokamak zum großen Teil auf Stellaratoren übertragen lassen, bleibt dies dem Tokamak ITER überlassen.

DER OPTIMIERUNGSPROZESS. Ausgangspunkt für die Optimierung war das Vertrauen in die Leistungsfähigkeit der Stellaratoren, aber auch die Einsicht, dass der Plasmaeinschluss in »klassischen« Anlagen, wie sie seit den 1950er Jahren untersucht wurden, unter Reaktorbedingungen dem der Tokamaks unterlegen ist. Die unbefriedigende Qualität ihres Magnetfeldkäfigs und dessen umständliche technische Realisierung durch spiralförmig um das Plasmagefäß gewickelte Magnetspulen machte diese Anlagen zu zweifelhaften Kandidaten für ein Fusionskraftwerk. Die Stellaratorforschung im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik ging deshalb gänzlich neue Wege: Man begann mit der systematischen Suche nach dem optimalen Magnetfeld. Unter den zahllosen möglichen Stellarator-Konfigurationen wurden mit erheblichem Theorie- und Rechenaufwand die besten, d. h. für das Plasma stabilsten und wärmeisolierendsten Felder gesucht, für die dann eine geeignete Form der Magnetspulen berechnet wurde: »Advanced Stellarators«. Möglich wurden diese Arbeiten erst durch die schnellen neuen Rechenanlagen, die inzwischen zur Verfügung standen.

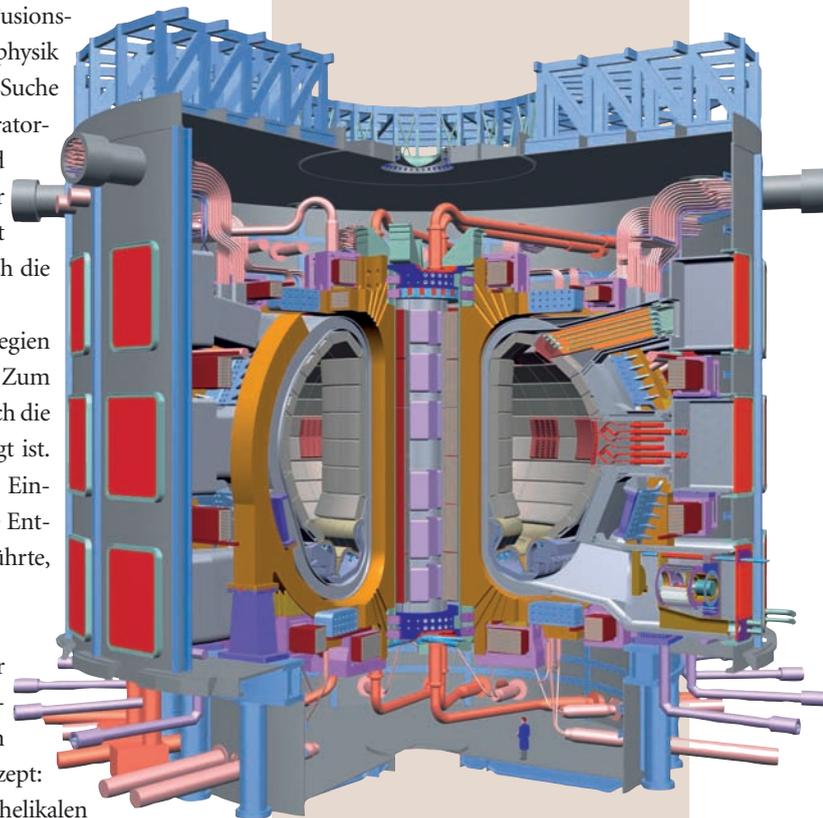
Neben leistungsfähigen Computern und ausgefeilten Optimierungsstrategien waren für den Erfolg aber auch grundsätzliche Erkenntnisse notwendig. Zum Beispiel, dass der vergleichsweise schlechte Einschluss der Stellaratoren durch die fehlende Symmetrie der komplexen dreidimensionalen Geometrie bedingt ist. Diejenigen physikalischen Größen, die beim klassischen Stellarator den Einschluss bestimmen, lassen sich aber dennoch symmetrisch gestalten – eine Entdeckung, die zur Entwicklung der »quasi-symmetrischen« Stellaratoren führte, mit einer dem Tokamak vergleichbaren Einschlussqualität.

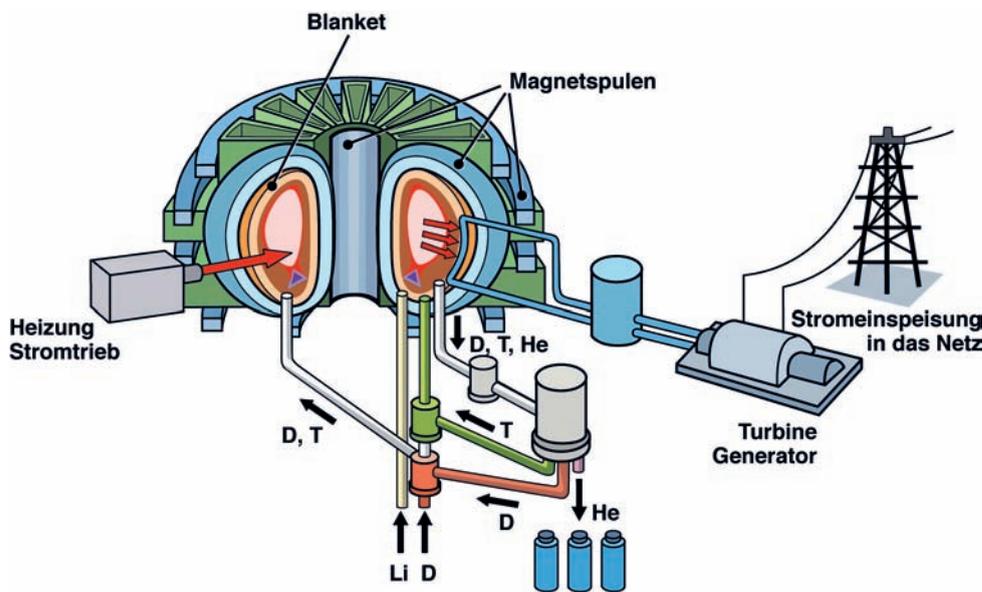
DIE WENDELSTEIN-STELLARATOREN. Wendelstein 7-AS (1988–2001) war der erste Stellarator, bei dem Überlegungen dieser Art am Anfang der Planung standen. Dabei entschloss man sich zusätzlich zu der verbesserten Magnetfeld-Konfiguration auch für ein technisch optimiertes Spulenkonzept: Man trennte sich von den üblichen, für ein Kraftwerk aber untauglichen, helikalen



Das 100 Millionen Grad heiße Plasma in der Fusionsanlage ASDEX Upgrade.

Die internationale Fusionstestanlage ITER im Entwurf.





Das Fusionskraftwerk im Schema.

Wicklungen und erzeugte das Feld durch einen einzigen Satz modularer, nicht-ebener Einzelspulen. In rund 60.000 Plasmaentladungen konnte Wendelstein 7-AS die erwarteten Vorzüge zeigen: Das berechnete Magnetfeld ließ sich von den neuartigen Spulen mit der nötigen Genauigkeit erzeugen. Die Entladungen wurden standardmäßig ohne Nettostrom gefahren. Die zugrunde gelegten Optimierungsprinzipien hat Wendelstein 7-AS bestätigt und dabei alle Stellarator-Rekorde in seiner Größenklasse – Einschluss, Dichtegrenze, Stabilitätsparameter und relative Pulslänge – gebrochen. 1992 war es sogar gelungen, das bei den Tokamaks so erfolgreiche H-Regime zu realisieren – erstmals in einem »Nicht-Tokamak«.

Obwohl man gegenwärtig ein brennendes Plasma nur mit einem Tokamak zu erreichen glaubt, könnten dennoch Stellaratoren die technisch vorteilhaftere Lösung für ein Fusionskraftwerk sein. Theoretisch ist dies nicht zu entscheiden; ein Schlüsselexperiment zur Klärung dieser Frage ist Wendelstein 7-X. Hierfür wurden – parallel zum Bau und Betrieb von Wendelstein 7-AS – die numerischen und theoretischen Stellaratorstudien weitergeführt. Der in zehn Jahren Entwicklungszeit von der Abteilung Stellarator-Theorie erarbeitete, vollständig optimierte Wendelstein 7-X soll die Stellaratoren als leistungsfähige Alternative auf das Niveau der bislang

Kryostat: (griech. *kryos*, kalt); ein Kühlgefäß, in dem sehr tiefe Temperaturen möglichst konstant eingehalten werden können.

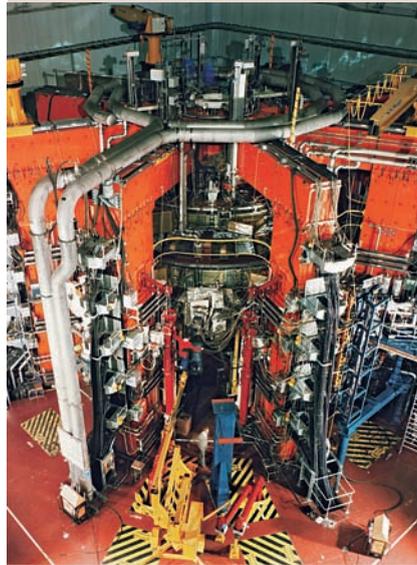
bevorzugten Tokamaks heben. Kernstück der Anlage ist das Spulensystem aus 50 nicht-ebenen und supraleitenden Magnetspulen. Mit ihrer Hilfe soll Wendelstein 7-X das wesentliche Plus der Stellaratoren vorführen, den Dauerbetrieb.

FUSIONSKRAFTWERKE AB MITTE DES JAHRHUNDERTS. Der Tokamak ITER soll zeigen, dass ein energielieferndes Fusionsfeuer möglich ist. Auf technologischer Seite liegen weitere Herausforderungen vor allem in der Materialforschung: Parallel zu ITER ist die Entwicklung neutronenbeständiger Baumaterialien mit geringem Aktivierungspotenzial sowie von hitze- und erosionsbeständigen Materialien für das Plasmagefäß voranzutreiben. Auf ITER soll dann eine Demonstrationsanlage, DEMO, folgen, die alle Funktionen eines Kraftwerks erfüllt. Wenn Wendelstein 7-X seine berechneten guten Eigenschaften experimentell bestätigen kann, dann könnte dieses Demo-Kraftwerk auch ein Stellarator sein. Angesichts von je zwanzig Jahren Planungs-, Bau- und Betriebszeit für ITER und seinen Nachfolger DEMO könnte ein Fusionskraftwerk also gegen die Mitte des Jahrhunderts wirtschaftlich nutzbare Energie liefern.

Dieses künftige Kraftwerk (siehe Schemazeichnung links) wird schalenförmig wie eine Zwiebel aufgebaut sein: Das ringförmige Plasma im Zentrum ist umgeben von einer sogenannten »ersten Wand«, dann dem »Blanket« und dem Vakuumpfäß, auf das die Magnetfeldspulen aufgefädelt sind. Wegen der bei Tieftemperatur arbeitenden supraleitenden Magnete ist der gesamte Kern in einem **Kryostaten** eingeschlossen. Der Brennstoff – Deuterium und Tritium – wird in Form gefrorener Kügelchen tief in das Plasma hineingeschossen. Etwa 35 Gramm Brennstoff pro Stunde verbraucht ein Kraftwerk von 1000 Megawatt elektrischer Leistung. Bis zur Zündung führt eine Startheizung dem Plasma für einige Sekunden eine Leistung von 50 bis 100 Megawatt zu. Die schnellen Heliumkerne, die bei den nun einsetzenden Fusionsreaktionen entstehen, sind als geladene Teilchen im Magnetfeld gefangen und geben ihre Energie über Stöße an das

Plasma ab. Schließlich kann die äußere Heizung weitgehend abgeschaltet werden; das Plasma brennt selbständig weiter und hält die hohe Fusionstemperatur per Selbstheizung aufrecht. Die entstehenden Neutronen verlasen das Plasma ungehindert und werden im Blanket, der inneren Verkleidung der Gefäßwand, abgebremst. Dort geben sie ihre gesamte Bewegungsenergie in Form von Wärme ab. Im Blanket erzeugen die Neutronen zudem aus Lithium den Brennstoffbestandteil Tritium, das mit Hilfe eines Spülgases entfernt und dem Brennstoffkreislauf wieder zugeführt wird. Die »Asche« der Fusionsreaktion, das Helium, wird durch den sogenannten Divertor abgeführt. Die in Blanket und Divertor abgegebene Wärme wird durch ein Kühlmittel – Helium oder Wasser – zum Dampferzeuger transportiert, um Strom zu produzieren, der dann an das Netz abgegeben wird. Die konventionellen Teile des Kraftwerks – Dampferzeuger, Turbine und Generator – unterscheiden sich kaum von ähnlichen Komponenten in heutigen Kohle- oder Kernkraftwerken.

SICHERHEITS- UND UMWELTEIGENSCHAFTEN. Überlegungen zur Sicherheit gelten dem radioaktiven Tritium und den energiereichen Fusionsneutronen, welche die Wände des Plasmagefäßes aktivieren. Eine naturgesetzlich gegebene Eigenschaft eines Fusionskraftwerks ist: Es kann so konstruiert werden, dass es keine Energiequellen enthält, die – wenn sie außer Kontrolle geraten – eine Sicherheitshülle von innen zerstören könnten. Ein Unfall mit katastrophalen Folgen ist aus prinzipiellen physikalischen Gründen unmöglich. Klimaschädliche Emissionen treten nicht auf. Als radioaktiver Abfall bleiben die Wände des Plasmagefäßes zurück, die nach Betriebsende zwischengelagert werden müssen. Die Aktivität des Abfalls nimmt rasch ab, nach etwa hundert Jahren auf ein Zehntausendstel des Anfangswerts. Nach ein- bis fünfhundert Jahren Abklingzeit ist der radiotoxische Inhalt bereits vergleichbar mit dem Gefährdungspotential der gesamten Kohleasche aus einem leistungsgleichen Kohlekraftwerk, die stets natürliche radioaktive Stoffe enthält. Werden entsprechende Rezyklier-



Das europäische Gemeinschaftsexperiment JET, das größte Fusionsexperiment weltweit.

ISABELLA MILCH leitet die Abteilung »Presse- und Öffentlichkeitsarbeit« des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Garching/Greifswald.

ungstechniken angewandt, so wäre nach hundert Jahren Abklingzeit kein Abfall mehr zu isolieren. Das gesamte Material wäre dann freigegeben bzw. in neuen Kraftwerken wiederverwendet.

Mit diesen günstigen Eigenschaften und ihrem nahezu unerschöpflichen Brennstoffreservoir könnte die Fusion eine der Stützen einer nachhaltigen Energieversorgung werden: Mit etwa 1.500 Megawatt elektrischer Leistung würden Fusionskraftwerke vor allem die Grundlast bedienen und ließen sich wie heutige Großkraftwerke in das Verbundsystem der Stromversorgung einbinden. Auch in einer stark von erneuerbaren Energien dominierten Stromwirtschaft fänden Fusionskraftwerke ihren Platz: als Puffer für die von der Witterung abhängigen Wind- und Sonnenkraftwerke. Ebenso könnten sie zur Wasserstoffherzeugung genutzt werden.

Eine Studie zur Entwicklung des europäischen Energiemarktes ab 2050 zeigt, dass Fusion als neue und vergleichsweise kapitalintensive Technologie dann in den europäischen Markt eindringen kann, wenn der Ausstoß des Treibhausgases Kohlendioxid deutlich reduziert werden soll. Dann könnte Fusion im Jahr 2100 etwa 20 bis 30 Prozent des europäischen Strombedarfs decken. ■■

DIE INTERNATIONALE FUSIONSTESTANLAGE ITER.

Eingeleitet wurde das ITER-Projekt 1985 als Symbol für das Ende des kalten Krieges bei Gesprächen des damaligen sowjetischen Generalsekretärs Gorbatschow mit den Präsidenten Frankreichs und der USA, Mitterand und Reagan. Im Frühjahr 1988 begannen dann am Garching Max-Planck-Institut für Plasmaphysik als Gastlabor europäische, japanische, russische und bis 1997 auch US-amerikanische Fusionsforscher mit den Planungsarbeiten. 2001 waren die Baupläne an den zwischenzeitlich drei ITER-Zentren in Garching, im japanischen Naka/Japan und San Diego/USA fertig gestellt. Wesentliche Bauteile sind als Prototypen gebaut und getestet. 2003 schlossen sich dem Projekt China und Südkorea an; auch die USA kehrten in die Zusammenarbeit zurück. Nach langwierigen Verhandlungen über den Standort der Testanlage einigten sich die Partner im Juni 2005 auf den europäischen Vorschlag: Cadarache im Süden Frankreichs. Kurz danach kam Indien als siebter Projektpartner hinzu. Die Baukosten der Anlage wurden im Jahr 2000 auf rund 4,6 Milliarden Euro veranschlagt. Der Gastgeber Europa übernimmt davon die Hälfte, Japan, China, Indien, Russland, die USA und Südkorea teilen sich die Restsumme zu gleichen Teilen. Nach etwa zehn Jahren Bauzeit, so die Planung, werden rund 600 Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker und Angestellte rund zwanzig Jahre an der Anlage arbeiten.