

Unbegrenzt Energie zur Verfügung zu haben – das ist nicht nur eine der großen Wunschvorstellungen der Menschheit, sondern auch eine große Herausforderung für die Forschung. Die Fusionsforschung hat sich dabei die Sonne zum Vorbild genommen und will zeigen, dass sich aus der Verschmelzung von Atomkernen Energie gewinnen lässt. Wegen der günstigen Umwelt- und Sicherheitseigenschaften könnte ein Fusionskraftwerk einen nachhaltigen Beitrag zur Energieversorgung der Zukunft leisten. Entscheidende Entwicklungsarbeit dafür wird am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching und Greifswald geleistet.

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching und Greifswald

► www.ipp.mpg.de/

Sonnenfeuer im Labor

Isabella Milch

Die Energiequelle von Sonne und Sternen, die Kernverschmelzung, in einem Kraftwerk auf der Erde nutzbar zu machen, ist das Forschungsziel des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP). Am Standort Garching bei München wird dazu ASDEX Upgrade betrieben, die größte Fusionsanlage in Deutschland. Ein alternatives Bauprinzip wird die Experimentieranlage Wendelstein 7-X untersuchen, die gegenwärtig im IPP-Teilinstitut Greifswald aufgebaut wird.

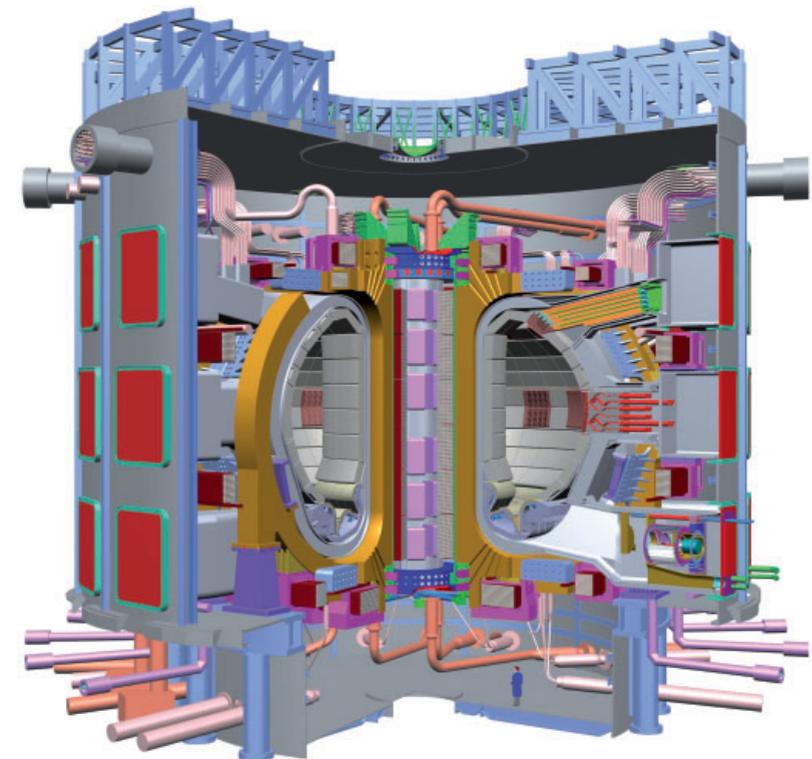
Fusionsbedingungen

Um das Fusionsfeuer in einem Kraftwerk zu zünden, muss der Brennstoff – ein dünnes, ionisiertes Gas, ein so genanntes Plasma, aus den Wasserstoffsorten Deuterium und Tritium – auf über 100 Millionen Grad aufgeheizt werden. 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 einschließen und von den Gefäßwänden fernhalten.

Nach diesem Prinzip Energie freizusetzen, gelang erstmals der europäischen Gemeinschaftsanlage JET (Joint European Torus) in Culham/Großbritannien, dem gegenwärtig größten Fusionsexperiment weltweit. 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 (lat.: ‚der Weg‘), der in weltumspannender Zusammenarbeit demnächst von den Partnern Europa, Japan, Russland, USA, China, Indien und Südkorea im südfranzösischen Cadarache errichtet wird. In seinem rund zehnmal größeren Plasmavolumen soll eine Fusionsleistung von 500 Megawatt erzeugt werden – zehnmal mehr, als zur Aufheizung des Plasmas verbraucht wird.

Forschungsanlage ASDEX Upgrade

Wesentliche physikalische Grundlagen für JET und ITER wurden von der Garchinger Forschungsanlage ASDEX Upgrade und deren Vorgängerin ASDEX erarbeitet. ASDEX Upgrade wird seit 1991 in Garching betrieben. Die Anlage soll Kernfragen der Fusionsforschung unter kraftwerksähnlichen Bedingungen untersuchen.



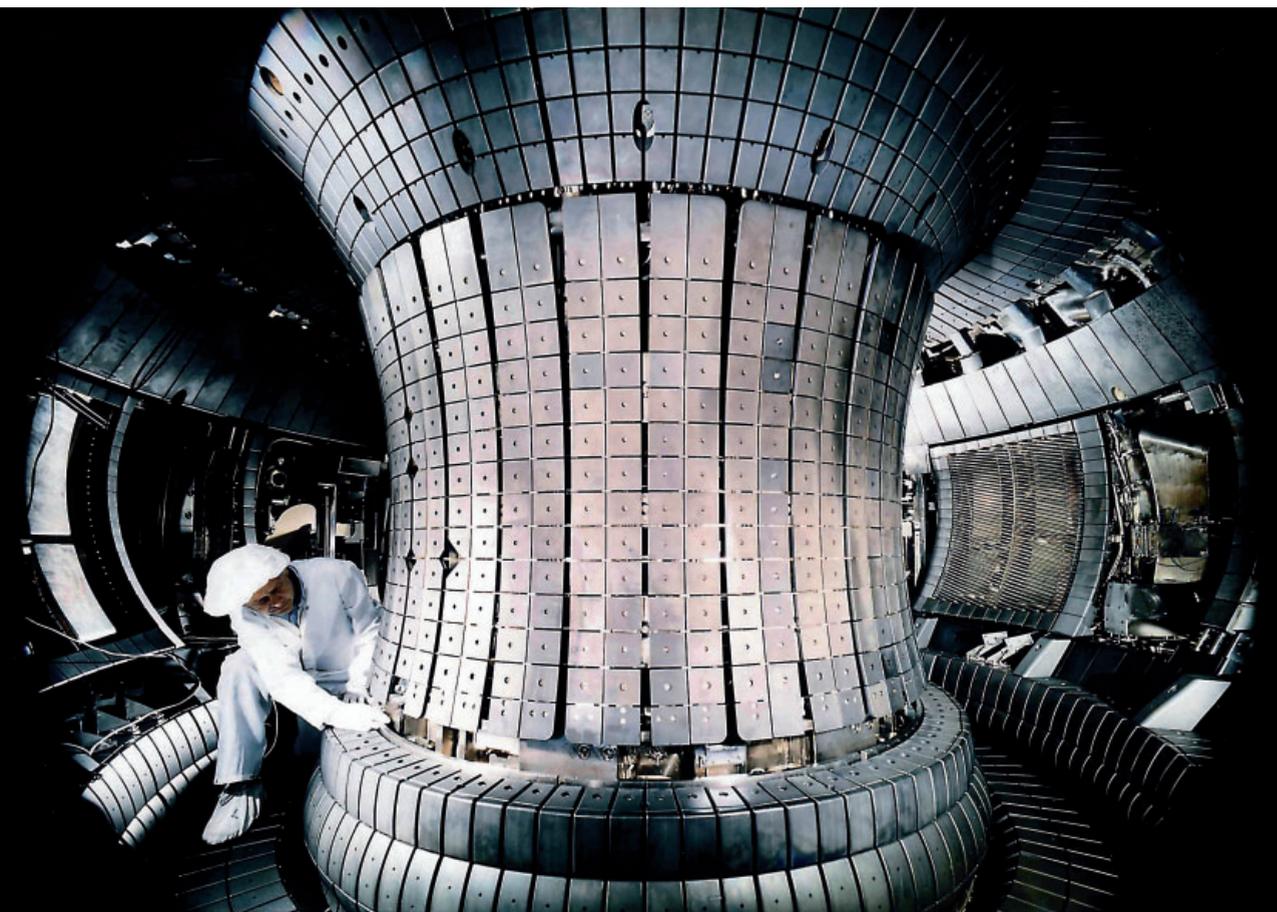
Die internationale Fusionstestanlage ITER im Entwurf (Grafik: ITER)

Wesentliche Eigenschaften des Plasmas sind dazu den Verhältnissen in einem späteren Kraftwerk angepasst. Ihren Namen – Axialsymmetrisches Divertorexperiment – verdankt die Anlage einer speziellen Magnetfeldanordnung, dem Divertor. Mit seiner Hilfe lässt sich die Wechselwirkung zwischen dem heißen Brennstoff und den umgebenden Wänden beeinflussen: Das Divertorfeld lenkt die äußere Rand-schicht des Plasmas auf Prallplatten ab. So werden störende Verunreinigungen aus dem Plasma entfernt, zugleich wird die Gefäßwand geschont und eine gute Wärmeisolation des Plasmas erreicht.

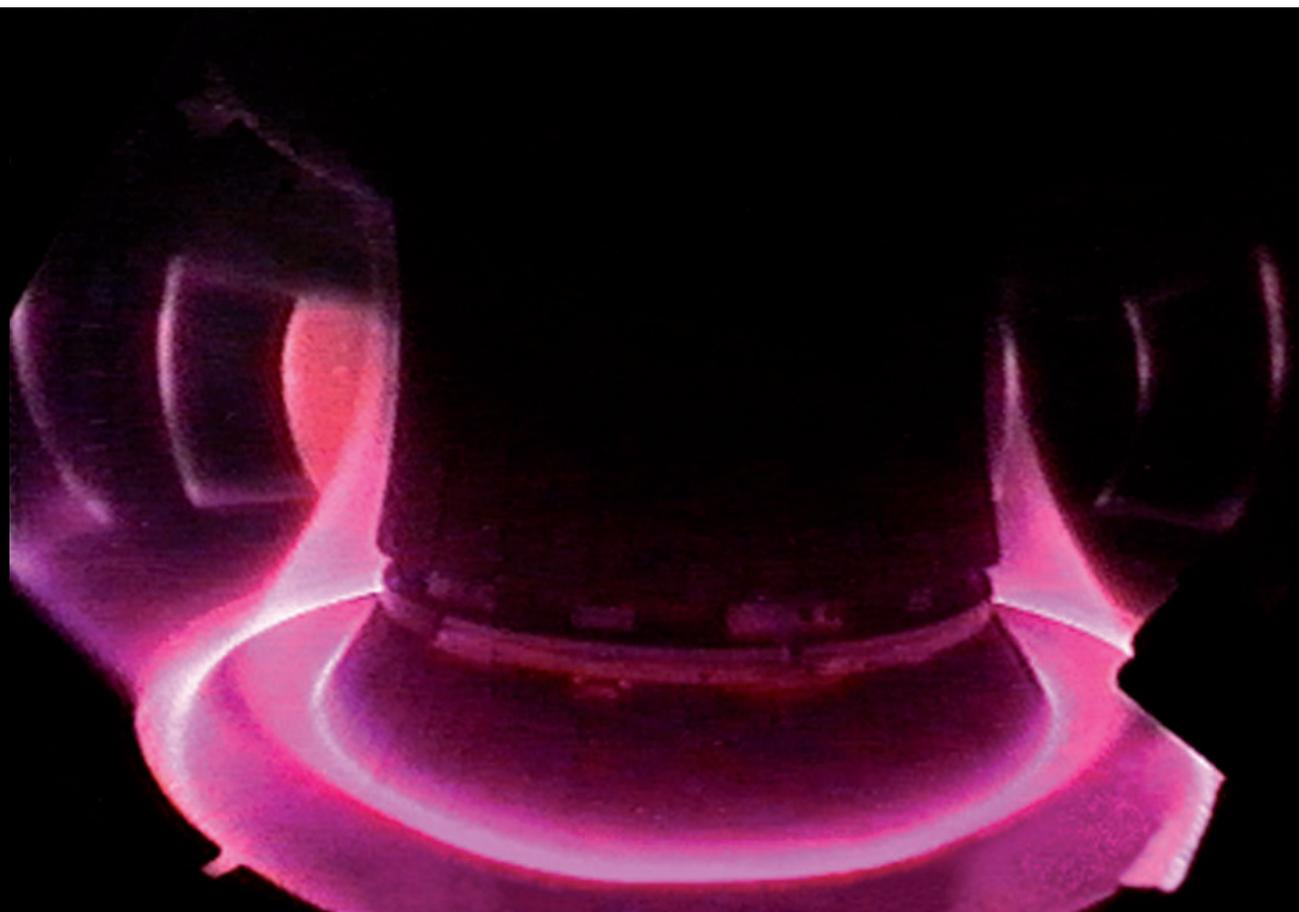
Auch nach den inzwischen abgeschlossenen Planungen für ITER sind die Arbeiten mit ASDEX Upgrade schwerpunktmäßig der Vorbereitung des Testreaktors gewidmet: Zur Optimierung des ITER-Betriebs beschäftigt sich ASDEX Upgrade zum Beispiel damit, Plasma-Zustände zu entwickeln, die möglichst gute Wärmeisolation des Plasmas mit langer Pulslänge verbinden. So wurde mit der Anlage eine Betriebsweise mit besonders hohem Energieinhalt des Plasmas entwickelt, das

„Verbesserte High-Confinement-Regime“: Je höher man den Energieinhalt des Plasmas und damit die Fusionsausbeute treiben kann, desto kleiner und damit kostengünstiger wird ein späteres Kraftwerk. Lässt sich dieser Plasmazustand auch in ITER einstellen, dann würde sich die zu erwartende Fusionsausbeute mindestens verdoppeln. Statt der angestrebten 400 Megawatt könnte ITER in dieser Betriebsweise bei sonst gleichen Bedingungen mehr als 800 Megawatt Fusionsleistung liefern.

ASDEX Upgrade, JET und ITER sind Fusionsanlagen vom Typ „Tokamak“, der heute weltweit am weitesten verbreiteten und am besten untersuchten Bauart. Sie bauen ihren Magnetfeldkäfig nur zu einem 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. Daher können Tokamaks nur pulsweise arbeiten, wenn nicht besondere Zusatzmaßnahmen ergriffen werden.



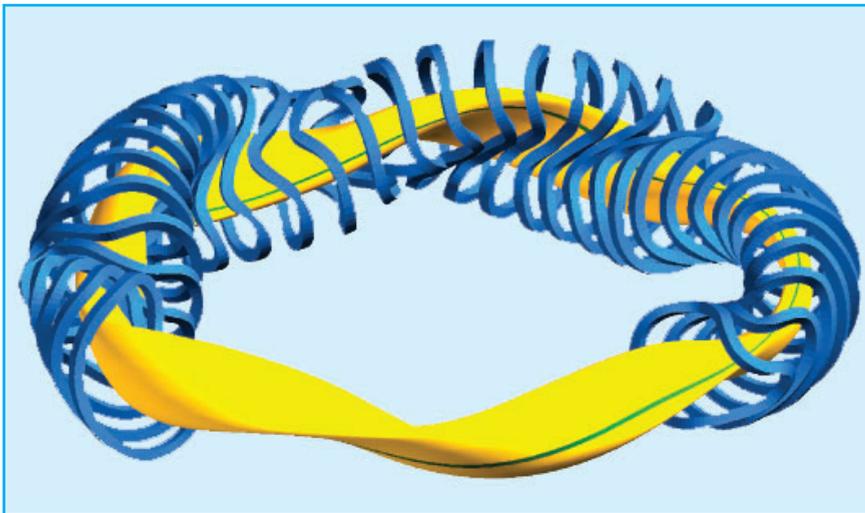
Blick in das Plasmagefäß der Fusionsanlage ASDEX Upgrade, der größten deutschen Fusionsanlage, im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching



Das 100 Millionen Grad heiße Plasma in der Fusionsanlage ASDEX Upgrade

Die Alternative: Stellaratoren

Im Unterschied zu Tokamaks sind Fusionsanlagen vom Typ „Stellarator“ von vorne herein für Dauerbetrieb geeignet: Sie werden ohne Plasmaströmung mit einem Feld betrieben, das ausschließlich durch äußere Spulen erzeugt wird. Dafür benötigen sie jedoch wesentlich komplexer geformte Magnetspulen als ein Tokamak.



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

Nach Vorarbeiten mit den Stellarator-Anlagen Wendelstein 7-A (1976 bis 1985) und Wendelstein 7-AS (1988 bis 2002) im IPP in Garching soll der Nachfolger Wendelstein 7-X die Kraftwerkstauglichkeit dieses alternativen Konzepts demonstrieren und die Stellaratoren als leistungsfähige Alternative auf das Niveau der bislang bevorzugten Tokamaks heben. Die Anlage wird derzeit in dem 1994 gegründeten IPP-Teilinstitut in Greifswald aufgebaut. Nach der Fertigstellung wird Wendelstein 7-X das weltweit größte Experiment vom Stellarator-Typ sein – mit einem Plasmavolumen von 30 Kubikmetern jedoch wesentlich kleiner als ITER. Kernstück der Anlage ist ein Spulensystem aus 50 nicht-ebenen und supraleitenden Magnetspulen. Mit ihrer Hilfe soll Wendelstein 7-X das wesentliche Plus der Stellaratoren vorführen, den Dauerbetrieb. Ein Energie lieferndes Plasma wird allerdings nicht angestrebt: Da sich dessen Eigenschaften vom Tokamak zum großen Teil auf Stellaratoren übertragen lassen, bleibt dies dem Tokamak ITER überlassen.

Plasmatheorie und Rechenzentrum

Um experimentelle Ergebnisse auszuwerten und Folgerungen daraus ziehen zu können, sind theoretische Untersuchungen unerlässlich. Die Simulation plasmaphysikalischer Vorgänge mit dem Computer steht dabei im Vordergrund: In den Theorie-Bereichen des IPP untersuchen und berechnen Physiker die Bewegung der Plasmateilchen im Magnetfeld und ihr Einschlussverhalten, Gleichgewichtszustände der heißen Plasmen, die Entstehung von Instabilitäten oder auch neuartige Magnetfeldspulen. Für diese Rechnungen ebenso wie zum schnellen Erfassen und Auswerten der umfangreichen Messdaten aus den Experimenten sind leistungsfähige Rechnersysteme erforderlich. Hierzu betreibt das IPP zusammen mit der Max-Planck-Gesellschaft in Garching ein gemeinsames Rechenzentrum.

Oberflächenphysik und Materialforschung

Die starken Belastungen, denen die innere Oberfläche des Plasmagefäßes ausgesetzt ist, werden im Garchinger Bereich Materialforschung des IPP im Detail untersucht. Zum Beispiel können energiereiche Plasmateilchen aus den Gefäßwänden Partikel herausschlagen, die das Plasma verunreinigen. Dabei kann zudem das Wandmaterial erodieren und seine Eigenschaften ändern. Auch neue Baustoffe für Fusionsanlagen entwickelt der Bereich und testet sie unter Plasmabelastung. Für besonders beanspruchte Stellen wird an Materialien und Beschichtungen gearbeitet, die – wie etwa kohlefaserverstärkter Kohlenstoff – hitzebeständig sind, wärmeleitfähig und widerstandsfähig gegen Erosion.

Für diese wissenschaftlichen Ziele werden zwei Großgeräte eingesetzt. Der Tandembeschleuniger dient vor allem der genauen Analyse von Oberflächenzusammensetzungen. Im Wärme-Teststand GLADIS (Garching Large Divertor Sample Test Facility), wird das Verhalten ganzer Bauteile unter extremen Wärmeflüssen untersucht. In dieser modernsten Testanlage Europas für hitzebeständige Großkomponenten von Fusionsanlagen können nicht nur kleine Proben, sondern große Bauteile mit eigener Wasserkühlung untersucht werden. Zurzeit werden mit GLADIS Komponenten für das im IPP Greifswald entstehende Fusionsexperiment Wendelstein 7-X geprüft. Anschließend soll die Anlage zur Vorbereitung des internationalen Testreaktors ITER genutzt werden.

Seit 2004 koordiniert der Bereich das Forschungsprogramm „Materialien für extreme Belastungen“ (ExtreMat), ein „Integriertes Projekt“ der Europäischen Union, das unter Leitung des IPP in Garching von einem europäischen Forschungs- und Industriekonsortium realisiert wird. Ziel ist die Entwicklung neuer Materialien, die extremen Belastungen gewachsen sind und neue Anwendungsbereiche in Energietechnik, Elektronik und Raumfahrt erschließen sollen. Bei einem Kostenvolumen von rund 35 Millionen Euro führt das Projekt 37 Partner aus ganz Europa zusammen, die alle Arbeitsfelder von der Grundlagen- über die anwendungsnahe Forschung bis hin zur industriellen Entwicklung abdecken.

Das Fusionskraftwerk

Die Rohstoffe der Fusion sind in nahezu unerschöpflichen Mengen überall vorhanden und sehr ergiebig: Ein Gramm Brennstoff könnte so viel Energie freisetzen wie elf Tonnen Kohle. Weil ein Kraftwerk zudem günstige Umwelt- und Sicherheitseigenschaften erwarten lässt, könnte die Fusion einen nachhaltigen Beitrag zur Energieversorgung der Zukunft leisten: Fusion ist nach heutigem Wissen eine katastrophenfreie Technik. Ein Kraftwerk kann so konstruiert werden, dass es keine Energiequellen enthält, die – wenn sie außer Kontrolle geraten – eine Sicherheitshülle von innen zerstören könnten. Es kann also nicht „durchgehen“. Als radioaktiver Abfall bleiben die Wände des Plasmagefäßes zurück, die nach Betriebsende zwischengelagert werden müssen. Die Aktivität des Abfalls nimmt rasch ab: nach etwa 100 Jahren auf ein zehntausendstel des Anfangswerts. Werden spezielle Materialien mit niedrigem Aktivierungspotenzial sowie effiziente Rezyklierungsverfahren entwickelt, so wäre nach 100 Jahren Abklingzeit kein Abfall mehr zu isolieren. Das gesamte Material wäre dann freigegeben bzw. in neuen Kraftwerken wieder verwendet.

Auf dem Weg zu einem Kraftwerk soll ITER zeigen, dass ein Energie lieferndes 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 voranzutreiben sowie von hitze- und erosionsbeständigen Materialien für das Plasmagefäß. Hinzu kommt ein begleitendes Physikprogramm – zum Beispiel die Entwicklung günstiger, die Gefäßwände möglichst wenig belastender Plasmazustände an ASDEX Upgrade. 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 20 Jahren Planungs-, Bau- und Betriebszeit für ITER und seinen Nachfolger DEMO könnten Fusionskraftwerke also um die Mitte des Jahrhunderts wirtschaftlich nutzbare Energie liefern.