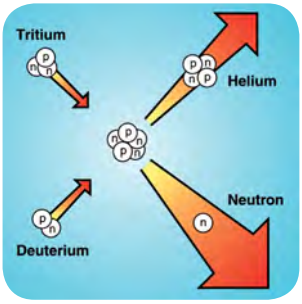
FUSION BASICS

Kernfusion Stand & Perspektiven

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Mit dem internationalen Experimentalreaktor ITER steht die Fusionsforschung vor der Demonstration eines Energie liefernden Plasmas. In einer weltumspannenden Kooperation von sieben Projektpartnern – China, Europa, Indien, Japan, Russland, Südkorea und den USA – wird ITER zurzeit im südfranzösischen Cadarache aufgebaut.

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 11 Tonnen Kohle. Die für den Fusionsprozess nötigen Grundstoffe – Deuterium und Lithium, aus dem im Kraftwerk Tritium hergestellt wird – sind in nahezu unerschöpflicher Menge überall auf der Welt vorhanden.

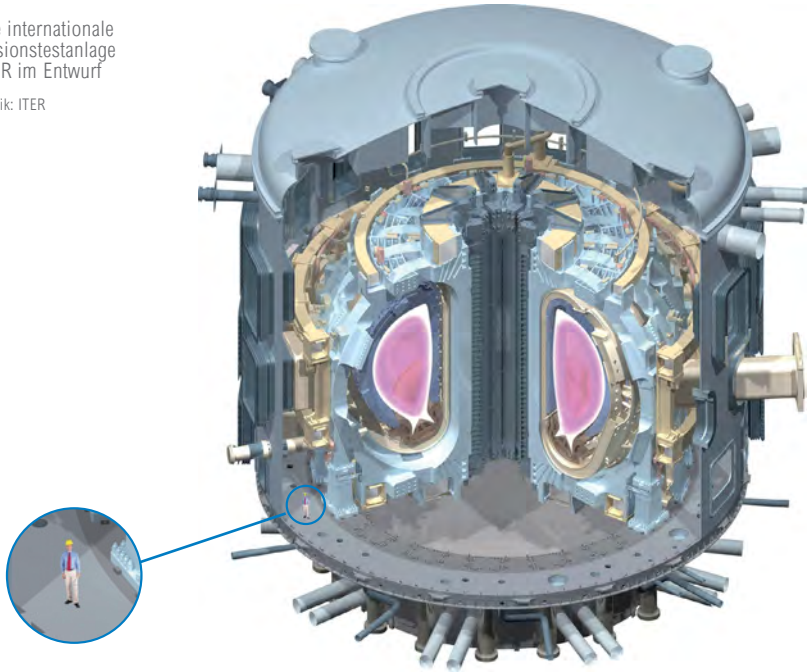


Fusionsreaktion

Grafik: IPP

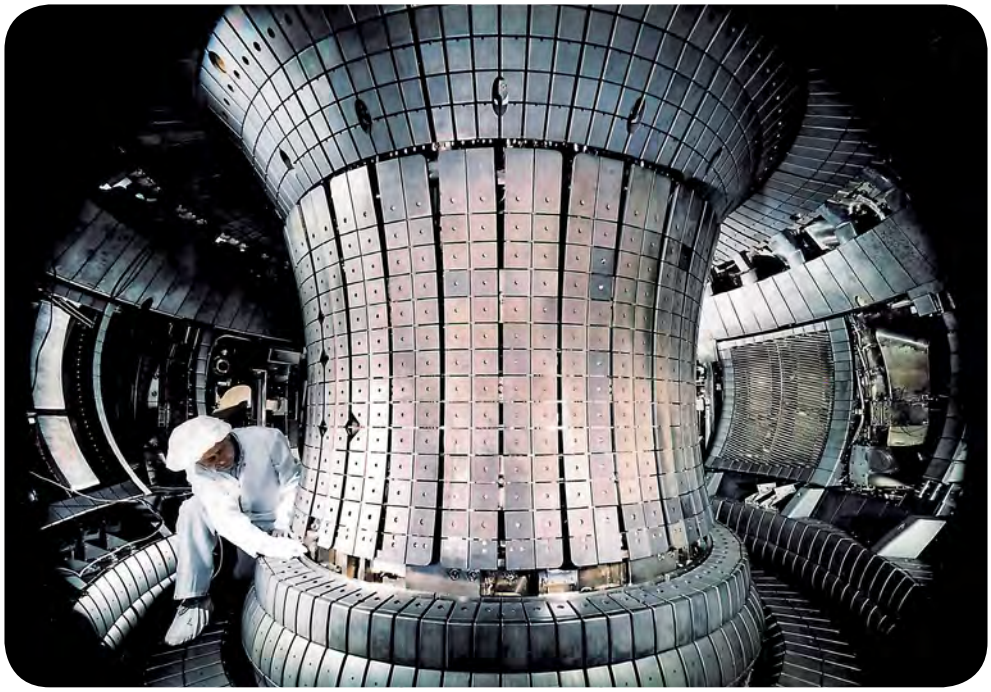
Wie ein Kohlefeuer setzt auch das Fusionsfeuer nicht selbständig, sondern erst bei den passenden Zündbedingungen ein. Für den Brennstoff – ein sehr dünnes, ionisiertes Gas, ein „Plasma“ – bedeutet dies eine Zündtemperatur von 100 Millionen Grad. Wegen der hohen Temperatur kann man das Plasma nicht unmittelbar 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. 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 zurück gewonnen. Für einen Nettogewinn an Energie ist das JET-Plasma mit seinen 80 Kubikmetern jedoch zu klein. Dies ist die Aufgabe des internationalen Experimentalreaktors ITER (lat.: ‚der Weg‘). In seinem rund 830 Kubikmeter umfassenden Plasmavolumen soll eine Fusionsleistung von 500 Megawatt erzeugt werden – zehnmal mehr, als zur Aufheizung des Plasmas verbraucht wird.



Die internationale Fusionstestanlage ITER im Entwurf

Grafik: ITER



Blick in das Plasmagefäß der Fusionsanlage ASDEX Upgrade

Foto: IPP

Die internationale Fusionstestanlage ITER | Eingeleitet wurde das ITER-Projekt 1985 als Symbol für das Ende des kalten Krieges in Gesprächen des damaligen sowjetischen Generalsekretärs Gorbatschow mit den Präsidenten Frankreichs und der USA, Mitterand und Reagan. Im Frühjahr 1988 begannen dann am Garchinger Max-Planck-Institut für Plasmaphysik als Gastlabor europäische, japanische, russische und bis 1997 auch US-amerikanische Fusionsforscher mit den Planungsarbeiten. Unterbrochen durch längere politische Entscheidungspausen zwischen der Projektgründung, der Entwurfs- und der Detailplanung waren 2001 die Baupläne an den zwischenzeitlich drei ITER-Zentren in Garching/Deutschland, Naka/Japan und San Diego/USA fertig gestellt. Wesentliche Bauteile wurden 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 – Japan oder Europa – einigten sich die Partner 2005 auf den europäischen Vorschlag: Cadarache im Süden Frankreichs. Kurz danach kam Indien als Projektpartner hinzu.

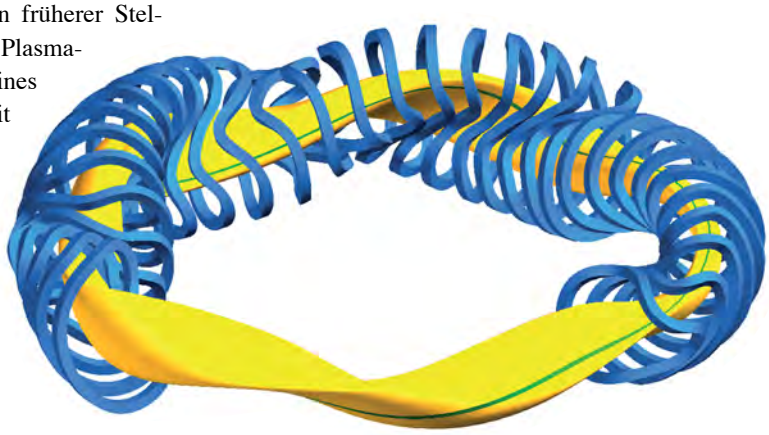
Die Verhandlungen über den rechtlichen und organisatorischen Rahmen des Projekts wurden 2007 mit der Gründung der internationalen ITER-Organisation beendet. Der Aufbau hat begonnen: erste Bauten sind errichtet, Industrieaufträge werden erteilt. Die Beiträge der sieben ITER-Partner werden im wesentlichen in Form fertiger Bauteile bereitgestellt, die in den jeweiligen Ländern hergestellt und dann nach Cadarache geliefert werden. Nach etwa zehn Jahren Bauzeit wird 2025 das erste Plasma erwartet. Rund 1000 Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker und Angestellte werden dann rund zwanzig Jahre an der Anlage arbeiten.

Am weitesten verbreitet: Tokamak-Anlagen | JET und ITER sind Fusionsanlagen vom Typ „Tokamak“, der heute weltweit am weitesten verbreiteten und am besten untersuchten Bauart. Sie bauen ihren Magnetfeldkäfig zum einen Teil durch äußere Magnetspulen auf, die das Plasmagefäß umschließen. Der andere Teil wird von einem im Plasma fließenden elektrischen Strom erzeugt, der dort pulsweise von einem Transformator induziert wird. Tokamaks können deshalb ohne Zusatzmaßnahmen nur in Pulsen arbeiten.

Im Europäischen Fusionsprogramm wird an mehreren, unterschiedlich spezialisierten Tokamaks geforscht: Während die Großanlage JET das Plasmaverhalten in der Nähe der Zündung untersucht, bearbeiten die kleineren nationalen Anlagen – ASDEX Upgrade in Garching, TCV in der Schweiz, der mit supraleitenden Magnetspulen arbeitende Tore Supra in Cadarache sowie FTU im italienischen Frascati – speziellere Fragen: Zum Beispiel widmet sich ASDEX Upgrade Themen, die für ein Demonstrationskraftwerk und für ITER wichtig sind: Hierzu gehört die Suche nach optimierten Betriebsweisen, d.h. die Entwicklung von Plasmazuständen mit verbesserter Wärmeisolation und verlängerter Pulsdauer. So werden die mit ASDEX Upgrade erarbeiteten Kenntnisse, die bereits in die ITER-Planung wesentlich einflossen, auch den wissenschaftlichen Betrieb der Anlage bestimmen.

Die Alternative: Stellaratoren | Im Unterschied zu Tokamaks können Fusionsanlagen vom Typ „Stellarator“ von vorne herein 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.

In Europa wird der Stellarator TJ-II in Madrid betrieben. In Greifswald ging 2015 Wendelstein 7-X in Betrieb, das weltweit größte Experiment vom Stellarator-Typ – 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 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.



Plasma und Magnetspulen der Stellarator-Anlage Wendelstein 7-X

Grafik: IPP

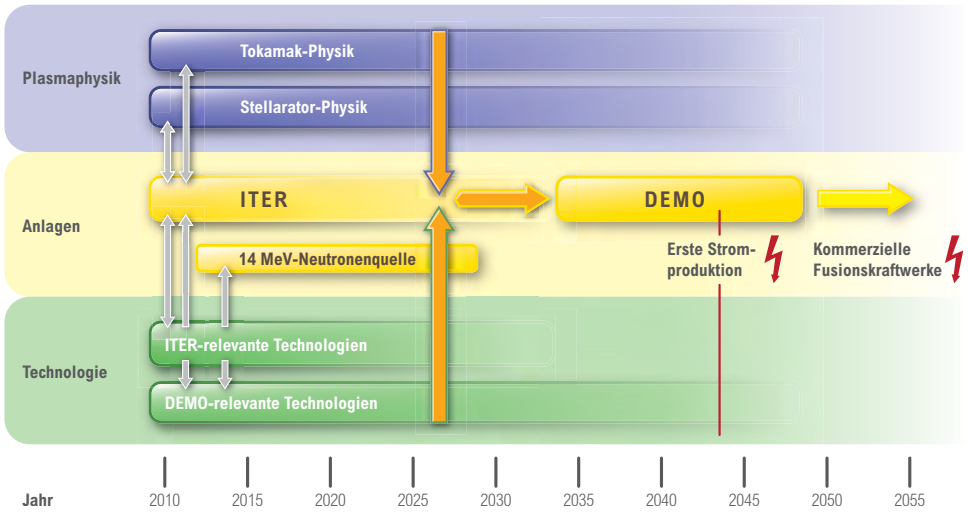
Fusionskraftwerke ab Mitte des Jahrhunderts | Der Tokamak ITER soll zeigen, dass ein Energie lieferndes Fusionsfeuer möglich ist. Auf technologischer Seite liegen weitere Herausforderungen vor allem in der Materialforschung: Parallel zu ITER sind – u.a. mit Hilfe einer Neutronenquelle – neutronenbeständige Baumaterialien mit geringem Aktivierungspotenzial zu entwickeln sowie hitze- und erosionsbeständige Materialien für das Plasmagefäß. 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 eines dieser Demo-Kraftwerke 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 wird schalenförmig wie eine Zwiebel aufgebaut sein: Das ringförmige Plasma im Zentrum ist umgeben von einer so genannten „ersten Wand“, dann dem „Blanket“ und dem Vakuumgefäß, 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 hinein geschossen. 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

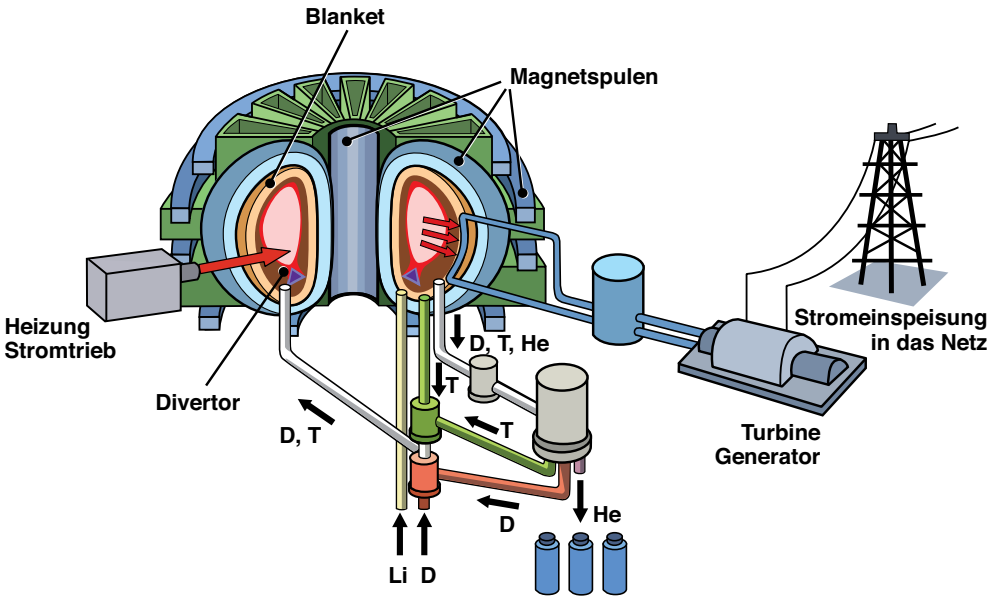
Der Weg zur wirtschaftlichen Nutzung der Fusion

Grafik: IPP, Reinald Fenke



Aufbau eines Fusionskraftwerks

Grafik: IPP, Karin Hirl



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 verlassen 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 so genannten 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 in das Netz eingespeist 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 Rezyklierungstechniken angewandt, so wäre nach hundert Jahren Abklingzeit kein Abfall mehr zu isolieren. Das gesamte Material wäre dann zum einen Teil freigegeben, zum anderen Teil in neuen Kraftwerken wieder verwendet.

Mit diesen günstigen Eigenschaften und ihrem nahezu unerschöpflichen Brennstoffreservoir könnte die Fusion eine der Stützen einer nachhaltigen Energieversorgung werden: Mit etwa 1500 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 Wasserstofferzeugung 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.