



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. Deuterium wird als schwerer Wasserstoff bezeichnet, weil sein Kern neben einem Proton auch ein Neutron enthält. Tritium wird überschwerer Wasserstoff genannt, weil sich zwei Neutronen im Kern befinden.

Deuterium und Tritium verschmelzen zu Helium, wobei Neutronen freierwerden, die große Energiemengen transportieren können: Ein Gramm Brennstoff könnte in einem Kraftwerk die Verbrennungswärme von etwa 11 Tonnen Braunkohle freisetzen. Oder anders gerechnet: Ein Kilogramm Brennstoff würde den jährlichen Energiebedarf von 1000 Mitteleuropäern decken.

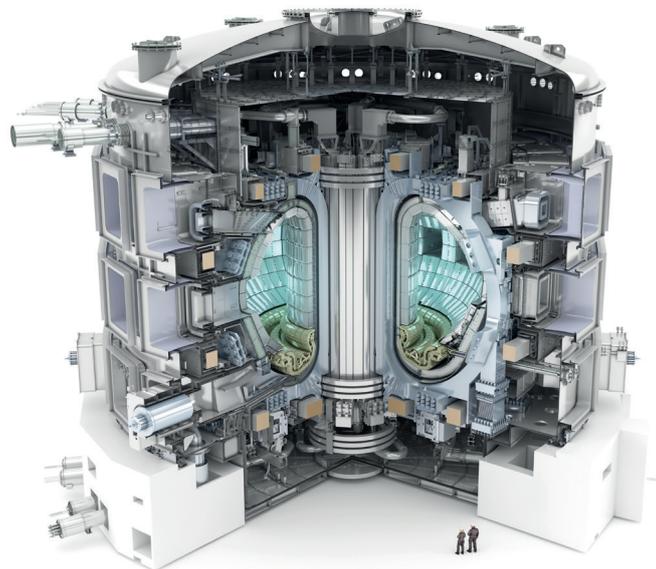
Die dafür notwendigen Grundstoffe – Deuterium und Lithium, aus dem im Kraftwerk Tritium hergestellt wird – sind auf der Erde in großen Mengen vorhanden.

Magnetfusion vs. Laserfusion

Die Fusionsforschung konzentriert sich im Wesentlichen auf zwei Konzepte:

Bei der **Magnetfusion** wird ein mehr als 100 Millionen Grad Celsius heißes Plasma in einem Magnetfeld eingeschlossen. In diesem Plasma verschmelzen leichte Atomkerne, die dabei große Energiemengen freisetzen.

Bei der **Laserfusion** (auch Trägheits- oder Inertialfusion genannt) erreicht man die Verschmelzung, in-



*Die Fusionssteanlage ITER wird derzeit in Südfrankreich gebaut.
(Grafik: Fusion for Energy)*

dem man mit hochenergetischen Laserstrahlen auf ein wenige Millimeter großes Brennstoff-Kügelchen schießt. US-Forscherinnen und -Forscher vom Lawrence Livermore National Laboratory gelang damit Ende 2022 ein wichtiger wissenschaftlicher Erfolg: Sie konnten erstmals mehr Fusionsenergie freisetzen, als sie an Laserenergie investiert hatten.

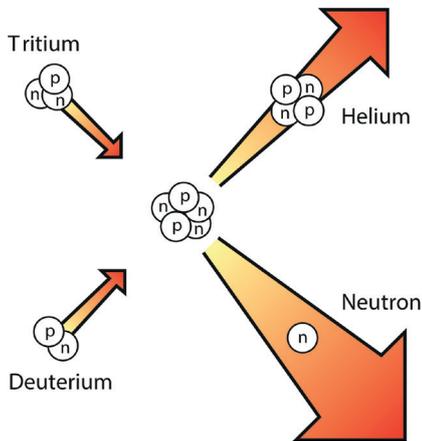
Tatsächlich liegt aber die Magnetfusion bei der technologischen Realisierung eines Kraftwerks weit vorne. Deshalb verfolgen auch die meisten Forschungsinstitute und Unternehmen dieses Konzept – zum Beispiel beim Internationalen Forschungsreaktor ITER, der derzeit von sieben Projektpartnern (China, Europa, Indien, Japan, Russland, Südkorea, USA)

gemeinsam im südfranzösischen Cadarache gebaut wird.

Gleichzeitig investieren China und Großbritannien in nationale Programme zum Bau von Fusionskraftwerken. Und es existieren etwa 40 Start-up-Unternehmen, die für den Bau kommerzieller Kernfusionskraftwerke mehrere Milliarden Dollar von privaten Geldgebern eingesammelt haben.

Magnetfusion und Fusionsbedingungen

Wie ein Kohlefeuer setzt auch ein Fusionsfeuer nicht selbstständig, sondern erst bei passenden Zündbedingungen ein. Für den Brennstoff – ein sehr dünnes, ionisiertes Gas, ein „Plasma“ –



Bei der Fusionsreaktion werden Neutronen freigesetzt, deren Bewegungsenergie in Elektrizität umgewandelt werden kann. Die Energie des ebenfalls entstehenden Heliums soll in einem Fusionskraftwerk genutzt werden, um das Plasma zu heizen.
(Grafik: MPI für Plasmaphysik)

ergibt sich 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 das Plasma wärmeisolierend einschließen und von den Gefäßwänden fernhalten.

Nach diesem Prinzip Energie mit einem Deuterium-Tritium-Plasma freizusetzen, gelang erstmals 1991 an der europäischen Gemeinschaftsanlage JET (Joint European Torus) in Culham/Großbritannien, dem bis 2023 größten Magnetfusionsexperiment weltweit. Ende 2023 schaffte JET einen Weltrekord für Fusionsenergie: Die Anlage erzeugte 69 Megajoule während einer fünfsekündigen Plasmaentladung mit Deuterium-Tritium-Brennstoff. 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“). In seinem rund 840 Kubikmeter umfassenden Plasmavolumen soll eine Fusionsleistung von 500 Megawatt erzeugt werden – zehnmal mehr, als an Heizleistung in das Plasma eingespeist wird. ITER dient allein Forschungszwecken und wird keinen Strom liefern.

Die internationale Fusionstestanlage ITER

Initiiert wurde ITER 1985 als gemeinsames Projekt zur Überwindung des kalten Krieges in Gesprächen des damaligen sowjetischen Generalsekretärs Gorbatschow mit den Präsidenten Frankreichs und der USA, Mitterrand und Reagan. Im Frühjahr 1988 begannen dann am Garching Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

die Planungsarbeiten für ITER. Unterbrochen durch längere politische Entscheidungspausen zwischen der Projektgründung, der Entwurfs- und der Detailplanung sowie langwierigen Verhandlungen über den Standort wurde 2007 die internationale ITER-Organisation gegründet. Damit konnte der Bau der Anlage in Cadarache im Süden Frankreichs beginnen. Die Beiträge der sieben ITER-Partner werden im Wesentlichen in Form fertiger Bauteile bereitgestellt, die in den jeweiligen Ländern hergestellt und nach Cadarache geliefert werden. Ende Juli 2020 startete offiziell die Montage der ITER-Bauteile.

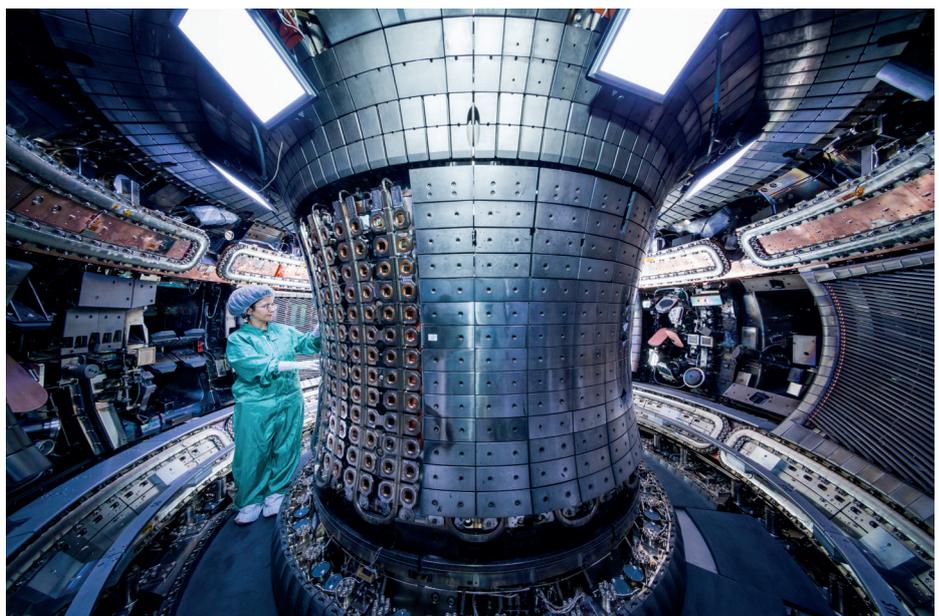
Am weitesten verbreitet: Tokamak-Anlagen

JET und ITER sind Magnetfusions-Anlagen vom Typ „Tokamak“, der heute weltweit am weitesten verbreiteten und am besten untersuchten Bauart. Tokamaks bauen ihren Magnetfeldkäfig zum einen Teil durch äußere Magnetspulen auf,

die das Plasmagefäß umschließen. Der andere Teil des Magnetfeldkäfigs wird von einem im Plasma fließenden elektrischen Strom erzeugt, der dort pulsweise von einem Transformator induziert wird. Tokamaks können deshalb prinzipbedingt nur gepulst betrieben werden.

Im Europäischen Fusionsprogramm EUROfusion wird mit mehreren, unterschiedlich spezialisierten Tokamak-Experimenten geforscht: Während die Großanlage JET bis zu ihrem Betriebsende im Dezember 2023 das Plasmaverhalten in der Nähe der Zündung untersuchte, bearbeiten die kleineren nationalen Anlagen – ASDEX Upgrade in Garching bei München, MAST in Großbritannien, TCV in der Schweiz (diese beiden Länder sind assoziierte Mitglieder) oder der mit supraleitenden Magnetspulen arbeitende WEST in Cadarache – 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 Untersuchung von Plasmazuständen mit verbesserter Wärmeisolation, effektiver Wärmeauskopplung und verlängerter Pulsdauer. So werden die mit ASDEX Upgrade erarbeiteten Kenntnisse, die bereits in die ITER-Planung wesentlich einfließen, auch den wissenschaftlichen Betrieb der Anlage mitbestimmen.

Ende 2023 erzeugte außerdem



Blick in das Plasmagefäß ASDEX Upgrade in Garching bei München, einer Tokamak-Fusionsanlage (Foto: MPI für Plasmaphysik, Jan Hosan)

der Tokamak JT-60SA in Japan sein erstes Plasma. Das japanisch-europäische Gemeinschaftsprojekt ist größer als JET, aber kleiner als ITER. Wie dieser ist er mit supraleitenden Magnetspulen ausgerüstet und soll sowohl den ITER-Betrieb unterstützen als auch zur Vorbereitung eines künftigen Demonstrationskraftwerks dienen.

Die Alternative: Stellaratoren

Im Unterschied zu Tokamak-Anlagen vom Typ „Stellarator“ von vornherein 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.

Am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald ging 2015 Wendelstein 7-X in Betrieb, das weltweit größte Experiment vom Typ Stellarator – mit einem Plasmavolumen von 30 Kubikmetern jedoch wesentlich kleiner als ITER. Wendelstein 7-X soll die Kraftwerkstauglichkeit dieses alternativen Konzepts demonstrieren. Das Ziel: die Qualität von Plasma-Gleichgewicht und -einschluss auf das Niveau von Tokamak heben. Dazu wurden das erzeugte Magnetfeld und die dafür benötigte Form der Magnetspulen mit Supercomputern errechnet, wodurch dieser Stellarator seinen Vorgängern überlegen ist. Mit Entladungen von bis zu 30 Minuten Länge soll Wendelstein 7-X die wesentliche Stellaratoreigenschaft demonstrieren: den Dauerbetrieb. Energie kann das Experiment nicht erzeugen. Dazu müsste die Anlage so groß sein wie ITER. Wesentliche Eigenschaften Energie liefernder Plasmen lassen sich allerdings von Tokamak auf Stellaratoren übertragen.

Fusionskraftwerke ab Mitte des Jahrhunderts

Der Tokamak ITER soll zeigen, dass ein Energie lieferndes Fusionsfeuer in einer Magnetfusionsanlage möglich ist. Auf technologischer Seite liegen weitere Herausforderungen vor allem im Bereich der Materialforschung und -qualifizierung: Parallel zu ITER müssen Forscherinnen und Forscher – u.a. mit Hilfe einer Neutronenquelle – hitze- und erosionsbeständige Materialien

für das Plasmagefäß entwickeln, die durch Fusionsneutronen möglichst wenig geschädigt und aktiviert (also radioaktiv) werden. Auf ITER soll eine Demonstrationsanlage (DEMO) folgen, die alle Funktionen eines Kraftwerks zeigt. Wenn Wendelstein 7-X seine berechneten guten Eigenschaften experimentell bestätigen kann, dann könnte ein künftiges Demonstrationskraftwerk auch ein Stellarator sein.

Das gesamte Forschungsprogramm ist so angelegt, dass ein Fusionskraftwerk gegen Mitte des Jahrhunderts wirtschaftlich nutzbare Energie liefern könnte. Dieses künftige Kraftwerk wird schalenförmig wie eine Zwiebel aufgebaut sein: Das ringförmige Plasma im Zentrum ist von einer so genannten „ersten Wand“ umgeben. Dahinter folgt die innere Verkleidung des Vakuumsgefäßes – das Blanket – und schließlich das Vakuumsgefäß, auf das die Magnetfeldspulen aufgefädelt sind. Wegen der bei Tieftemperatur arbeitenden supraleitenden Magnete ist der gesamte Kern von einem so genannten Kryostaten umschlossen.

Der Brennstoff – Deuterium und Tritium – wird in Form gefrorener Kügelchen tief in das Plasma hineingeschossen. Etwa 50 Gramm davon pro Stunde verbraucht ein Kraftwerk mit 1000 Megawatt elektrischer Leistung. Bis zur Zündung des Fusionsplasmas führt eine Startheizung für einige Minuten eine Leistung von ungefähr 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. Dadurch kann die äußere Heizung weitgehend abgeschaltet werden; das Plasma brennt selbständig weiter und hält die hohe Fusionstemperatur per Selbstheizung aufrecht.

Die bei den Fusionsreaktionen 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



Stellarator Wendelstein 7-X: Die Abbildungen zeigen von oben nach unten die Plasmaform, die supraleitenden Stellarator-Magnetspulen, die geraden Magnetspulen, Verkabelung, Kühlleitungen und innere Stützstruktur, Teile des Außengefäßes und das gesamte Außengefäß. (Grafik: MPI für Plasmaphysik)

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, Helium, wird durch den sogenannten Divertor abgeführt. Der Divertor besteht aus gekühlten Prallplatten, zu denen die ionisierten Abfallprodukte der Fusionsreaktionen entlang von Magnetfeldlinien kontrolliert auf die Prallplatten gelenkt werden (engl.: to divert -> abführen). Die in Blanket und Divertor abgegebene Wärme wird durch ein Kühlmittel – Helium oder Wasser – zu einem Dampferzeuger transportiert. Der heiße Dampf dient

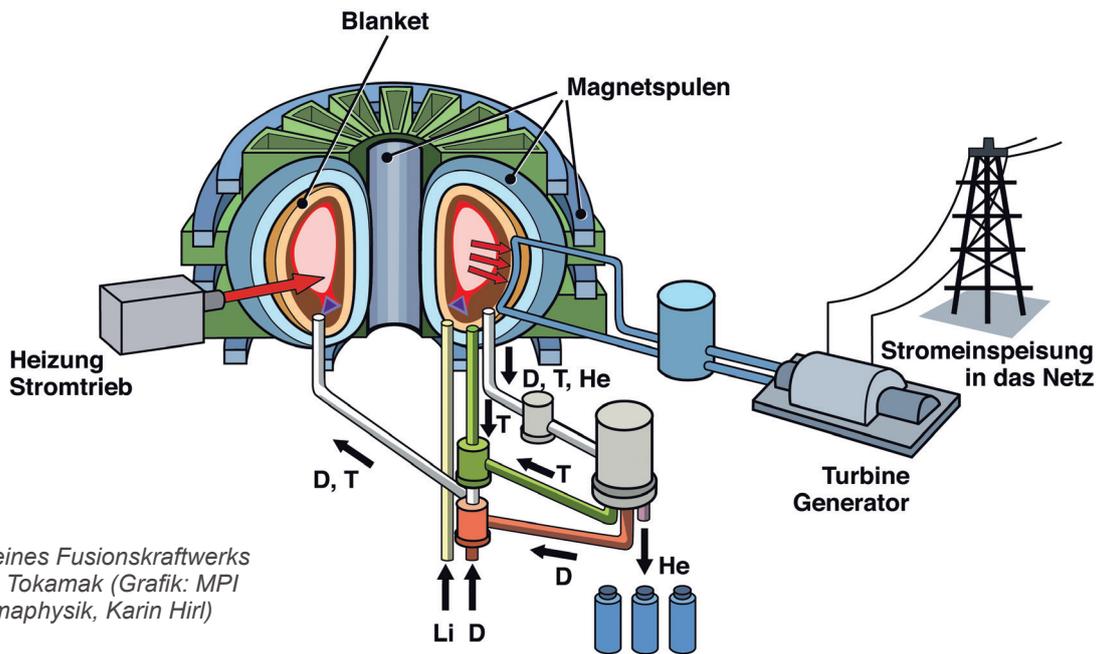
Gründen in einem Fusionskraftwerk ausgeschlossen. Das Plasma erlischt sofort, wenn sich seine Parameter außerhalb des gewünschten Bereichs bewegen. Anders als in einem Kernspaltungsreaktor, der von Anfang an den gesamten Brennstoffvorrat enthält, befinden sich in einem Fusionskraftwerk zu jedem Zeitpunkt nur wenige Gramm Brennstoff im Vakuumbehälter. Klimaschädliche Gase wie etwa Kohlendioxid stößt ein solches Kraftwerk nicht aus.

Die Wände des Plasmagefäßes müssen nach Betriebsende zwischengelagert werden. Diese Abfallmenge ist zunächst einmal größer als dieje-

dem Recycling per Fernhandlung (Remote Handling) bereits ein Jahr nach Abschaltung eines Fusionskraftwerks beginnen könnte. Anders als bei Kernspaltungsreaktoren sollte damit kein Endlager erforderlich sein.

Ausblick

Mit ihren günstigen Eigenschaften und ihrem großen Brennstoffreservoir könnte die Fusion eine der Stützen einer nachhaltigen Energieversorgung werden: Mit etwa einem Gigawatt elektrischer Leistung würden Fusionskraftwerke vor allem die Grundlast bedienen und ließen sich wie heutige Groß-



zur Erzeugung von Strom, der in das Netz eingespeist wird. Die konventionellen Teile eines Fusionskraftwerks – Dampferzeuger, Turbine und Generator – unterscheiden sich kaum von ähnlichen Komponenten in heutigen Kohle- oder Kernkraftwerken.

Sicherheits- und Umwelteigenschaften

Überlegungen zur Sicherheit von Fusionskraftwerken gelten dem radioaktiven Brennstoffbestandteil Tritium und den energiereichen Fusionsneutronen, welche die Wände des Plasmagefäßes aktivieren, also dort Radioaktivität erzeugen. Eine unkontrollierte Kettenreaktion ist aus prinzipiellen physikalischen

nige aus Kernspaltungskraftwerken. Allerdings handelt es sich dabei hauptsächlich um schwach radioaktive oder mittlerradioaktive Materialien, die ein viel geringeres Risiko für Umwelt und menschliche Gesundheit darstellen als hochradioaktive Materialien aus Spaltungskraftwerken. Die Strahlung dieser Fusionsabfälle nimmt deutlich schneller ab, als die von hochradioaktiven Abfällen aus Spaltungskraftwerken. Wissenschaftler forschen an Materialien für Wandkomponenten, welche die Aktivierung weiter reduzieren. Und sie entwickeln Recycling-Technologien durch die alle aktivierten Komponenten eines Fusionsreaktors nach einiger Zeit freigegeben oder in neuen Kraftwerken wiederverwendet werden können. Derzeit ist davon auszugehen, dass man mit

kraftwerke in das Verbundsystem der Stromversorgung einbinden. Auch in einer stark von erneuerbaren Energien dominierten Energiewirtschaft fänden Fusionskraftwerke ihren Platz: als Puffer für die von der Witterung abhängigen Wind- und Sonnenkraftwerke. Ebenso könnten sie zur Wasserstoffherzeugung und für die Bereitstellung von Wärme für Haushalte und Industrie genutzt werden.

Studien prognostizieren einen global deutlich steigenden Energiebedarf für die kommenden Jahrzehnte. Kernfusion ist eine der wenigen Optionen, um in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts kontinuierlich große Energiemengen ohne CO₂-Emissionen bereitzustellen.

Stand: November 2024