



Ohne Sonne gibt es kein Leben – das wussten schon unsere Vorfahren. Für die antiken Griechen schwang sich morgens ihr Gott Helios auf seinen Sonnenwagen, um für Licht und Wärme zu sorgen. Doch was lässt nun wirklich das Sonnenfeuer scheinbar ewig brennen? Darüber zerbrachen sich lange die klügsten Denker vergeblich den Kopf. 1852 kam Hermann von Helmholtz zu dem entsetzlichen Schluss, dass die Sonne schon nach

3021 Jahren ausgebrannt sein müsse. Dabei stehen aus Protonen. Dabei tragen Positronen, die Antimaterie-Gegenspieler der Elektronen, die überschüssige positive elektrische Ladung davon. Diese Verschmelzungsreaktion braucht allerdings enorme Temperaturen. Für die Sonne kein Problem: In ihrem Zentrum herrschen etwa 15 Millionen Kelvin. Dabei trennen sich die Kerne der leichten Atome völlig von ihren Elektronen. Sie formen ein heißes Gas aus elektrisch geladenen Teil-

Die Sonne im Tank – wie Fusionsforscher das Feuer einfangen

ging der berühmte Physiker von der Knallgasreaktion als Energiequelle aus, in der Wasserstoff chemisch mit Sauerstoff zu Wasser verbrennt. Erst im Jahr 1938 löste der deutsch-amerikanische Physiker und spätere Nobelpreisträger Hans Bethe das Rätsel: Nicht chemische Verbrennungsprozesse sind die Quelle solarer Glut, sondern die Verschmelzung von Atomkernen – und zwar überwiegend von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen. Diese **Kernfusion** setzt pro beteiligtem Wasserstoffatom rund vier Millionen Mal mehr Energie frei als die Knallgasreaktion. Dank dieser enormen Effizienz wird die Sonne mit ihrem Brennstoffvorrat zum Glück noch weitere 4,5 Milliarden Jahre auskommen.

chen, ein **Plasma**. Zudem existiert im Sonneninneren aufgrund der gewaltigen Gravitation ein enormer Druck: Umgerechnet 200 Milliarden Erdatmosphären pressen das Plasma so zusammen, dass ein Kubikzentimeter davon auf der Erde fast so viel wiegen würde wie 20 gleich große Würfel aus Eisen.

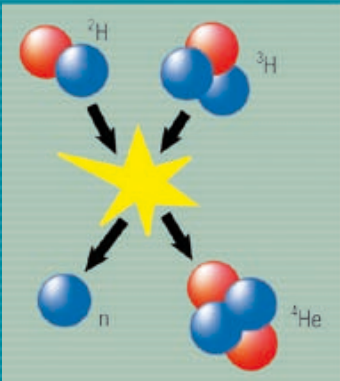
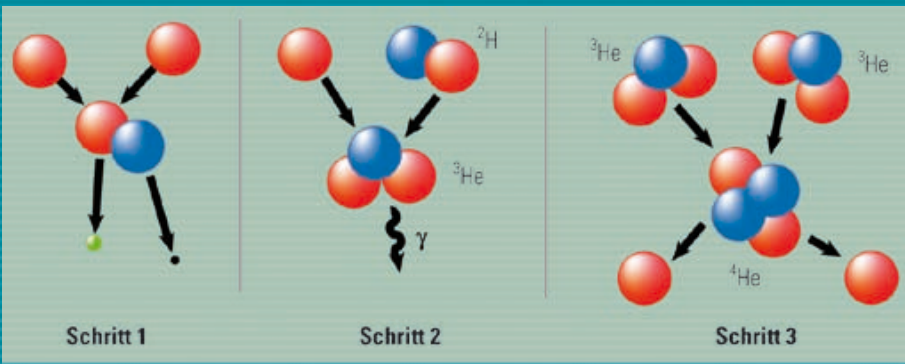
Nur unter so extremen Bedingungen überwinden die Protonen ihren Widerstand gegen die Fusionshochzeit. Normalerweise stoßen sie sich nämlich wegen ihrer gleichen elektrischen Ladung gegenseitig stark ab. Doch im heißen Sonneninneren flitzen die Protonen so schnell umher, dass sie trotzdem kollidieren können – Wärme ist in der →

▼ Die Energieproduktion der Sonne erfolgt aus der Verschmelzung von Atomkernen.



In ihrem Inneren laufen mehrere Fusionsreaktionen des leichten Wasserstoffs ab. Dabei dominiert eine Reaktion, die als „Proton-Proton-Reaktion 1“ bezeichnet wird: Vier Wasserstoff-Atomkerne, also Protonen, verschmelzen über Zwischenschritte zu einem Heliumkern aus zwei Protonen und zwei Neutronen
(Kasten, Seite 2). Die Neutronen ent-





▲ **a** Bei der „Proton-Proton-Reaktion 1“ in der Sonne verschmelzen erst zwei Protonen (rot) zu einem Kern des schweren Wasserstoffs Deuterium (^2H). Dabei verwandelt sich (Schritt 1) zunächst ein Proton in ein Neutron (blau), wobei ein Positron (grün) die überschüssige elektrische Ladung „entsorgt“ und ein Neutrino (schwarz) die Bilanz von Energie und (Dreh-) Impuls ausgleicht. In Schritt 2 fusionieren ein Proton und der Deuteriumkern (^2H) zu einem Helium-3-Kern (^3He). Ein Gammastrahlungsquant korrigiert wieder die Energie- und Impulsbilanz. Im dritten Schritt verschmelzen zwei ^3He -Kerne zu Helium-4 (^4He). Die überschüssigen zwei Protonen stehen für weitere Fusionsreaktionen zur Verfügung.

▲ **b** Im Fusionsreaktor verschmilzt je ein Deuterium-Kern (^2H) mit einem Tritium-Kern (^3H) zu einem Heliumkern (^4H), (Protonen: rot, Neutronen: blau). Dabei wird ein Neutron (n) mit einer Energie von 14,1 Milliarden Elektronenvolt frei.

© Grafik: Roland Wengenmayr

→ Mikrowelt nichts anderes als Bewegungsenergie. Sie nähern sich dabei bis auf 10^{-15} Meter an (d.i. ein Femtometer oder ein Billionstel von einem Millimeter), und an diesem „Umschlagspunkt“ beginnt die **Kernkraft** zu dominieren. Diese stärkste Kraft der Physik hat zwar nur eine geringe Reichweite, übertrifft innerhalb dieser jedoch die elektrische Kraft. Die Kernkraft kann deshalb auch die widerspenstigen Protonen zu Atomkernen verbinden; ohne sie gäbe es also weder Atome noch uns. Die Dichte des gepressten Sonnenplasmas sorgt überdies für ausreichend viele Zusammenstöße und hält so den solaren Fusionsofen warm.

In der griechischen Mythologie stahl ein gewisser Prometheus das Feuer von Helios' Sonnenwagen, um es den Menschen zu schenken. Zu den modernen Nachfahren des Prometheus gehören Forscher wie der inzwischen verstorbene Lyman Spitzer. In einem Vortrag am 11. Mai 1951 umriss der amerikanische Astronom von der *Princeton University*, wie sich das Sonnenfeuer auf die Erde holen ließe. Er hatte die entscheidende Idee, wie man das viele Millionen Grad heiße Plasma auf der Erde so einschließen kann, dass darin eine kontrollierte Kernfusion möglich wird. Denn der Kontakt mit einer materiellen Gefäßwand wäre fatal: Das Plasma würde schlagartig auskühlen und die empfindliche Fusionsreaktion sofort erfrieren.

Spitzer schlug vor, das Plasma in einem magnetischen Käfig schweben zu lassen. Da Plasma aus elektrisch geladenen Teilchen besteht, ist das möglich, denn Magnetfelder üben auf elektrische Ladungen Kraft aus. Damit skizzierte Spitzer das Grundprinzip zukünftiger Fusionsreaktoren. Magnetische Kräfte haben allerdings den Nachteil, dass sie ziemlich schwach sind. Sie können nur ein extrem dünnes Plasma gefangen halten, etwa 250.000-fach dünner als Luft auf Meereshöhe. Deswegen wird das heiße Plasma auch in großen Reaktoren nie mehr Druck aufbauen wie Luft in einem Fahrradreifen. So einfach lässt sich die Sonne also nicht kopieren.

ANGEHEIZTE WASSERSTOFFKERNE

Das gilt auch für die Fusionsreaktion. In einem künstlichen Reaktor würde die solare Proton-Proton-Reaktion viel zu langsam ablaufen. Aber zum Glück erlaubt die Natur alternative Fusionsreaktionen, und eine davon eignet sich besonders gut für den technischen Einsatz. Damit gelang es Plasmaphysikern bereits in den 1990er-Jahren, die kontrollierte Kernfusion anlaufen zu lassen, und zwar an der europäischen Forschungsanlage JET, *Joint European Torus*, im englischen Abingdon und am *Tokamak Fusion Test Reactor* (TFTR) der amerikanischen *Princeton University*. Diese alternative Fusionsreaktion braucht zwei Arten von schwerem Wasserstoff als Brennstoffkomponenten: das ist das

Wasserstoffisotop Deuterium, dessen Kern neben dem Proton ein Neutron enthält, und das noch schwerere **Tritium** mit einem Kern aus einem Proton und zwei Neutronen. Je ein Deuterium- und ein Tritiumkern verschmelzen zu einem Heliumkern (**Kasten, Abb. b**). Allerdings funktioniert das erst oberhalb von 100 Millionen Kelvin, ideal sind 300 Millionen Kelvin. Erst dann sind die schweren Wasserstoffkerne genügend in Fahrt, um effizient zu verschmelzen. Zehn bis zwanzigmal höhere Temperaturen als in der Sonne scheinen ein verrücktes Ziel zu sein. Doch sie sind in heutigen Plasmaexperimenten längst Routine geworden. Die Forschungsanlage *ASDEX Upgrade* am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching erreichte schon über 250 Millionen Kelvin.

Bei der Fusion von Deuterium mit Tritium bekommt der entstehende **Heliumkern** rund zwanzig Prozent der freiwerdenden Energie mit. Damit heizt er das von Auskühlung bedrohte Plasma nach. Die restlichen achtzig Prozent der Fusionsenergie trägt das Neutron davon. Als elektrisch neutrales Teilchen entkommt es dem Magnetkäfig und trifft auf die Wand des Reaktorgefäßes. In einem zukünftigen Kraftwerk werden die Neutronen dort den überwiegenden Teil der Fusionswärme auf ein Kühlmittel übertragen, zum Beispiel Wasser oder Helium. Das befördert die Wärmeenergie dann zu einer Turbinenanlage mit elektrischen Generatoren (**Abb. B**), genau wie bei konventionellen Kraftwerken. Die Energie des Neutrons entspricht 14,1 Millionen Elektronenvolt oder umgerechnet $2,3 \times 10^{-12}$ Joule. Dieser scheinbar winzige Wert ist im Vergleich zur chemischen Verbrennung gigantisch: Ein Gramm Brennstoff kann in einem **Fusionsreaktor** rund 90 Megawattstunden Wärmeenergie produzieren. Dafür muss man acht Tonnen Erdöl oder elf Tonnen Kohle verfeuern. Aber nicht nur die winzigen Brennstoffmengen wären ein Vorteil der Kernfusion: Sie setzt vor allem kein Klimaschädigendes Kohlendioxid frei. Und ihre „Asche“ ist nur ungefährliches Helium.

Das Neutron hat aber noch eine Aufgabe: Es soll in der Wand des Reaktorgefäßes die zweite Brennstoffkomponente Tritium erbrüten. Tritium ist radioaktiv mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Deshalb soll es der zukünftige Fusionsreaktor in einem geschlossenen Kreislauf herstellen und gleich wieder verbrauchen. Der „Rohstoff“ für das Tritium ist **Lithium**. Dieses dritte Element im Periodensystem und leichteste aller Metalle

wird in die Reaktorwand eingebracht. Trifft dort ein Neutron den Kern des Lithium-6-Isotops, dann zerfällt dieser zu einem Heliumkern und dem erwünschten Tritiumkern.

Die große Herausforderung ist ein effizienter magnetischer Einschluss des aus den beiden Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium bestehenden Plasmas. Beim Bau des Magnetfeldkäfigs für das Plasma nutzen die Fusionsforscher aus, dass die geladenen Plasmateilchen – die Protonen und Elektronen – von elektromagnetischen Kräften auf Spiralbahnen um die magnetischen Feldlinien gezwungen werden (Abb. C 1). Von einem geeignet geformten Magnetfeld wie auf Schienen geführt, können die Teilchen so von den Wänden des Plasmagefäßes ferngehalten werden. Für einen „dichten“ Käfig müssen die Feldlinien innerhalb des ringförmigen Plasmagefäßes geschlossene, ineinander geschachtelte Flächen aufspannen – wie die ineinander liegenden Jahresringflächen eines Baumstammes (Abb. C 2). Auf diesen Flächen ist der Plasmadruck jeweils konstant, während er von Fläche zu Fläche – vom heißen Zentrum nach außen – abnimmt.

VERDRILLTE MAGNETFELDER

Diese ineinander geschachtelten „Magnetröhren“ würden nun jedoch die Plasmateilchen an ihren Enden verlieren – mitsamt der kostbaren Wärmeenergie. Deshalb werden sie zu einem Ring geschlossen. Allerdings wird dadurch das Magnetfeld auf der Innenseite des Rings stärker als auf der Außenseite, weil sich die Feldlinien dort dichter zusam-

mendrängen. In der Folge würde das Plasma nach außen aus dem Ring schleudern. Um das zu verhindern, verdrillen die Physiker das Magnetfeld nochmals in sich. Die Feldlinien schrauben sich um die „Jahresringe“ herum: So führen sie die Plasmateilchen immer wieder vom schwächeren Magnetfeld auf der Ringaußenseite zurück ins dichtere Magnetfeld innen – das Plasma bleibt gefangen. Das erfordert jedoch eine komplizierte Anordnung der Magnetfeldspulen. Die Stellaratoren, die „Sternemaschinen“ (lat. *stella* für Stern), an denen die Fusionsforscher in den 1950er- und 1960er-Jahren arbeiteten, scheiterten zunächst daran. Erst heute können Supercomputer die Geometrie der Spulen so genau berechnen, dass der Stellarator wieder im Rennen um das beste Konzept für einen Fusionsreaktor ist (Abb. D 1). Am Teilinstitut Greifswald des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik entsteht gerade der Stellarator Wendelstein-7X.

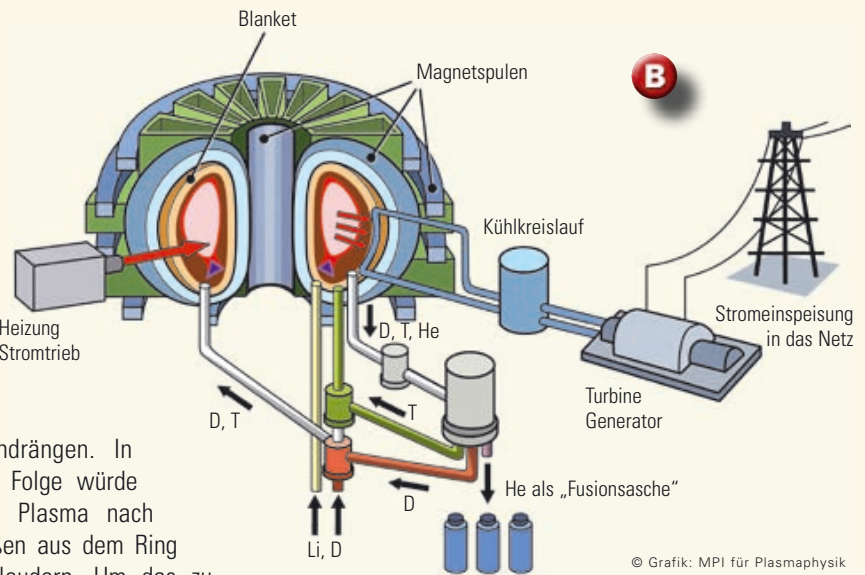
Er soll zeigen, dass Stellaratoren das heiße Plasma zuverlässig einschließen können.

Die Nase vorn hat derzeit aber ein konkurrierendes Prinzip:

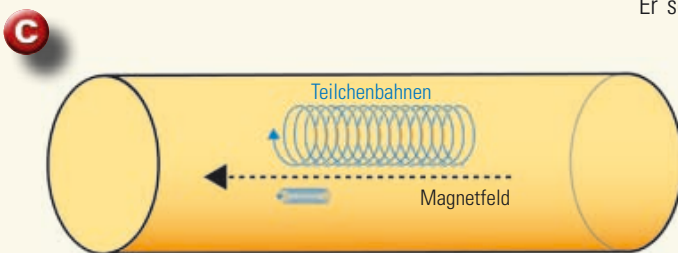
▲ **Schema eines zukünftigen Fusionskraftwerks vom sogenannten Tokamak-Typ.** Im „Blanket“, das das Vakuumgefäß mit dem Plasma von außen umschließt, erbrüten die Neutronen aus dem zugeführten Lithium das Tritium. Das Tritium wird dann abgetrennt und dem Plasma zugesetzt (T: Tritium, D: Deuterium, He: Helium, Li: Lithium).

der Tokamak (Abb. D 2). Der Name kommt aus dem Russischen „*Toroidalnaya kamera s magnetnymi katuschkami*“ und bedeutet auf Deutsch „ringförmige Kammer mit magnetischen Spulen“. Während Stellaratoren den Magnetfeldkäfig ausschließlich mit Hilfe äußerer Spulen aufbauen, stellen Tokamaks einen Teil dieses Feldes durch einen im Plasma fließenden elektrischen Strom her. Dieser erzeugt ein um sich wirbelndes Magnetfeld, das das Plasma wie einen Schlauch zusammenhält. Er funktioniert auch als Plasmaheizung. Der Tokamak ist einfacher aufgebaut als ein Stellarator. Deshalb verhalf er der Fusionsforschung zu hohen Plasmatemperaturen. Als Transformator induziert er im Plasma allerdings nur Strom, solange sich die Stromstärke in seiner Primärspule ändert. Er muss also im Gegensatz zum Stellarator mit Pulsen arbeiten. Für einen Kraftwerksbetrieb ist das nicht sehr praktisch, auch wenn sich ein Puls über Stunden ausdehnen lässt. Deshalb forschen die Plasmaphysiker an einer alternativen Betriebsweise: Zusätzliche elektromagnetische Hochfrequenzfelder sollen das Auf und Ab der Pulse so ausgleichen, dass im Plasma ein Gleichstrom fließt.

Entscheidend ist ein perfekter magnetischer Einschluss, der das heiße Plasma möglichst gut isoliert und nicht auskühlen lässt. Einige wichtige Ideen dazu haben die Garching Max-Planck-Wissenschaftler entwickelt. Sie fließen nun in den Bau des großen interna-



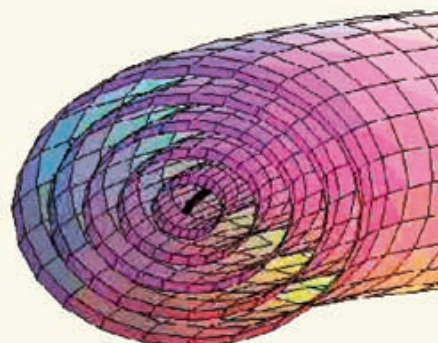
© Grafik: MPI für Plasmaphysik



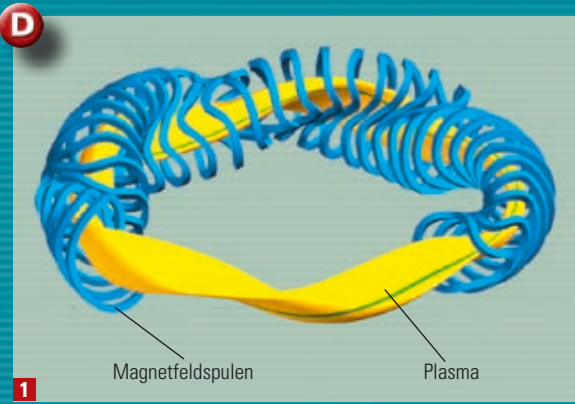
© Grafik: Roland Wengenmayr

▲ **1** Die elektrisch geladenen Teilchen des Plasmas bewegen sich entlang der Magnetfeldlinien (schwarzer Pfeil) auf Spiralbahnen. Der Radius der Spirale hängt von der Masse der Teilchen ab: Die schwereren Protonen umschreiben größere Spiralen als die Elektronen.

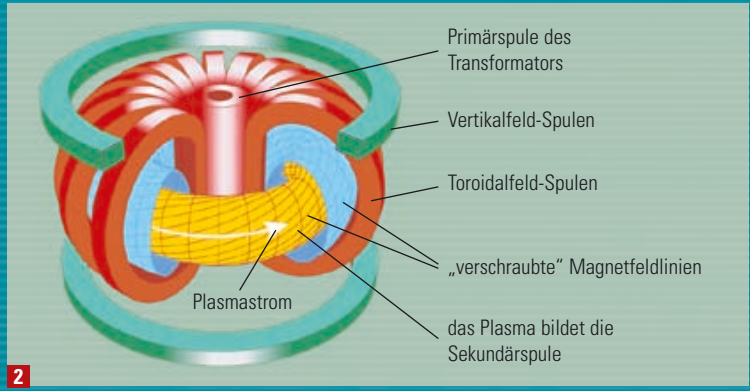
▶ **2** Die magnetischen Flächen sind sauber ineinander geschachtelt – wie die Jahresringflächen eines Baumstammes. So werden nach außen weisende Feldkomponenten vermieden, die die Plasmateilchen auf die Wände führen würden. Die hohen Zündtemperaturen wären dann unerreichbar.



© Grafik: MPI für Plasmaphysik



© Grafik: MPI für Plasmaphysik



© Grafik: MPI für Plasmaphysik

▲ In einem Stellarator wird der magnetische Käfig durch ein einziges Spulensystem erzeugt – ohne einen Längsstrom im Plasma und ohne Transformator. Damit sind Stellaratoren für Dauerbetrieb geeignet. Der Verzicht auf den ringförmigen Plasmaström bedeutet jedoch, dass die schraubenförmige Verdrillung der Feldlinien ausschließlich durch äußere Magnetspulen (blau) erreicht werden muss. Diese müssen entsprechend „verwunden“ sein und formen das Plasma (gelb) zu einem fünfeckigen „Ring“, der in sich verdreht ist.

▲ Zum Aufbau des Magnetkäfigs benötigt ein Tokamak drei sich überlagernde Magnetfelder: Erstens ein ringförmiges Feld, das durch die sogenannten Toroidal-Feld-Spulen erzeugt wird und das Plasma (gelb) zu einem Ring formt. Zweitens das Feld eines im Plasma fließenden Stroms. Dieser Plasmaström (weißer Pfeil) wird durch eine Transformatorspule (in der Mitte) induziert. In dem kombinierten Feld (geschachtelte Ringflächen in blau und gelb) laufen die Feldlinien nun schraubenförmig um. So wird die zum Einschluss des Plasmas nötige Verdrillung der Feldlinien und der Aufbau magnetischer Flächen erreicht. Und drittens benötigt der Tokamak ein vertikales Feld, das die Lage des Stromes im Plasma fixiert (Vertikalfeldspulen in grün).

→ tionalen Forschungsreaktors ITER (lat. „der Weg“) ein, der in Cadarache, Südfrankreich, entsteht. Voraussichtlich 2020 soll ITER richtig „zündet“ und dann erstmals mehr Fusionsenergie erzeugen als seine Plasmaheizung verbraucht – und zwar zehnfach soviel. Klappt das, dann könnte um 2035 DEMO folgen: Dieser Prototyp eines Kraftwerks soll aus der Fusionswärme bereits elektrischen Strom erzeugen. Ab Mitte dieses Jahrhunderts wären die ersten kommerziellen Fusionskraftwerke möglich. Die Menschheit hätte sich dann eine fast unerschöpfliche Energiequelle erschlossen. Sie könnte den weltweit rasch wachsenden Bedarf an elektrischer Energie decken, ohne gefährliche Treibhausgase freizusetzen. Der

Brennstoffvorrat wäre gigantisch, denn schon 0,08 Gramm Deuterium und 0,2 Gramm Lithium würden genügen, um den heutigen Jahresbedarf einer Familie an elektrischem Strom zu erzeugen. Das Deuterium steckt in schwerem Wasser (D_2O), das in allen Ozeanen natürlicherweise vorkommt. Lithium ist Bestandteil von Mineralien, die fast überall in der Erdkruste existieren. Die Energieversorgung wäre kein Anlass mehr für geopolitische Konflikte.

WENIG RADIOAKTIVITÄT

Doch jede Form der Energiegewinnung hat ihren Preis: Kernkraftwerke enthalten sehr stark radioaktiv strahlende Brennelemente, der Einsatz fossiler Brennstoffe dreht gefährlich an der Klimaschraube, große Wasserkraftwerke oder Windparks verändern Landschaften. Bei der Kernfusion ist das Innere des Reaktorgefäßes radioaktiv. Die Brennstoffmengen sind jedoch vergleichsweise winzig, und die empfindliche Fusionsreaktion kann nicht „durchgehen“. Sie ist also anders als die Kettenreaktion der Kernspaltung selbstsichernd: Bricht das Magnetfeld zusammen, dann berührt das Plasma die Wand, kühlt schlagartig aus und die Fusionsreaktion stoppt. Die Wand übersteht das aufgrund der geringen Plasmadichte fast ohne Schaden. Der schlimmste denkbare Unfall wäre ein Entweichen des Tritiums aus dem Reaktor.

Die Menge wäre zwar sehr klein, doch das schnell zerfallende Tritium kann Krebs verursachen. Diese Möglichkeit eines Unfalls nehmen die Planer eines zukünftigen Kraftwerks sehr ernst, auch wenn seine Folgen nicht im Entferntesten mit einem Kernkraft-GAU zu vergleichen wären. Der jahrelange Neutronenbeschuss wird allerdings einen Teil des Reaktorgefäßes radioaktiv „aktivieren“. Das gilt vor allem für bestimmte Stahlegierungen, in denen Spurenelemente sich in radioaktive Isotope umwandeln. Teile der Reaktorwand müssten einige hundert Jahre lang gelagert werden, bis diese **Radioaktivität** abgeklungen ist. Dieses Problem wollen die Forscher durch die Entwicklung neuer Materialien entschärfen. Und dafür haben sie ja noch einige Jahre Zeit.

Schlagerwörter: Kernfusion, Plasma, Kernkraft, Fusionsreaktor, Tokamak, Stellarator, Deuterium, Tritium, Helium, Lithium, Radioaktivität

Lesetipp: „Kernfusion – Berichte aus der Fusionsforschung“ zum Download auf der Website des MPI für Plasmaphysik (www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen)

Internetlinks:

- www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/index.html (unter Fusion 21, Experimenttypen/IPP-Projekte)
- www.fzk.de (unter Forschungsthemen/Energie/Kernfusion)
- www.iter.org

◀ **Fertigung des Plasmagefäßes für Wendelstein 7-X: Zwanzig dieser Elemente werden zu einem Ring zusammengefügt. In seiner Form schmiegert er sich den verwundenen Konturen des Plasmas an. Die Öffnungen im Gefäß machen das Plasma für Heizung und Messgeräte zugänglich.**



© Foto: Wolfgang Filser

DIE „MAX“-REIHE

auch unter www.max-wissen.de – der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: