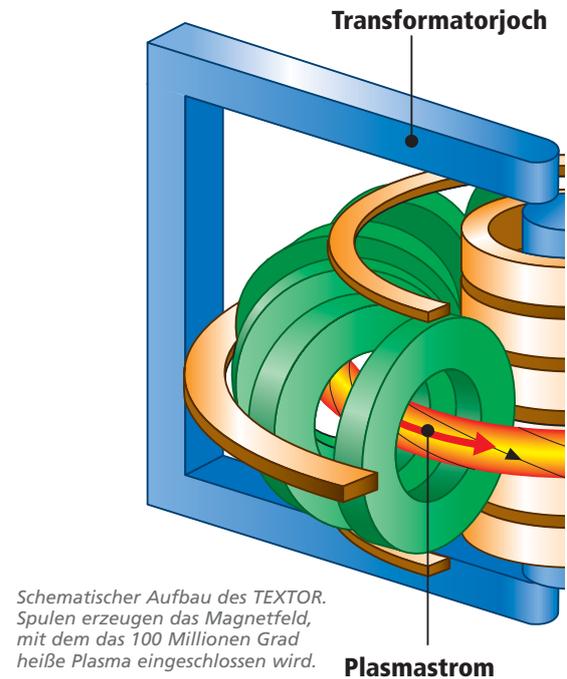


Durchhalten im Sonnenfeuer

Das Sonnenfeuer brennt bereits auf der Erde – einige Sekunden erst in heutigen Testanlagen, mindestens acht Minuten werden es beim Fusionsreaktor ITER im französischen Cadarache ab 2015 sein. Ob die Menschheit es vollends bündigt, hängt entscheidend von der Wirtschaftlichkeit ab. Ein wichtiger Kostenfaktor: Durch den Kontakt mit dem heißen Fusionsplasma verschleißt die Reaktorwand schnell. Deshalb erforschen Jülicher Wissenschaftler die Prozesse, die beim Zusammentreffen von Plasma und Wand ablaufen.

Einerseits ist ein Kontakt des mehr als 100 Millionen Grad heißen Plasmas mit den Wänden einer Fusionsanlage unerwünscht. Auch wenn die Plasmadichte in Fusionsreaktoren etwa 250 000-mal geringer ist als die Dichte der Erdatmosphäre, können die Plasmateilchen an den Reaktorwänden beträchtliche Schäden anrichten. Zudem verringert jedes Atom, das aus der Wand herausgeschlagen wird, die Temperatur des Plasmas. Wenn zu viele Verunreinigungen in das Plasma eindringen, erlischt das „Kernfeuer“.

Andererseits ist der Kontakt des Plasmas mit den Wänden unvermeidbar. Obwohl Magnetfelder das Plasma einschließen, um es von den Wänden fernzuhalten, kommt es zu Wandkontakten – teilweise mit Vorsatz. „Denn wir müssen die Asche der Kernfusion – das Helium – aus dem Plasma entfernen, sonst erstickt die Fusion“, erläutert Prof. Ulrich Samm, Direktor am Institut für Plasmaphysik. Zu diesem Zweck

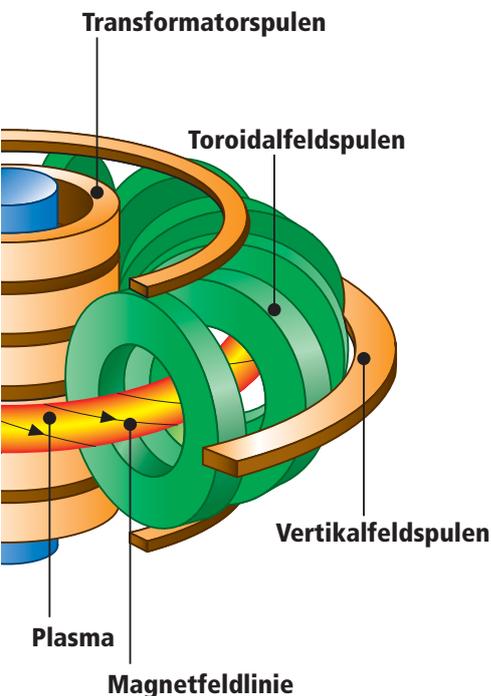


Schematischer Aufbau des TEXTOR. Spulen erzeugen das Magnetfeld, mit dem das 100 Millionen Grad heiße Plasma eingeschlossen wird.

lenken die Magnetfelder das Plasma auf die so genannten Divertorplatten. Das sind besonders verstärkte Bereiche der Reaktorwände. Hier werden dann das Helium und die Verunreinigungen abgepumpt.



Ein Techniker befestigt Graphitplatten im Jülicher TEXTOR.



Magnetfeldlinie

Aufgrund ihrer Forschungsreihen am Jülicher Fusionsexperiment TEXTOR, den die Jülicher Wissenschaftler zusammen mit Partnern aus Belgien und den Niederlanden betreiben, favorisieren sie als Beschichtung für die besonders kritischen Wandstellen derzeit Graphit, also Kohlenstoff. „Der naheliegendste Vorteil von Graphit ist“, sagt Samm, „dass er nicht schmilzt, sondern bei etwa 3550 Grad Celsius gleich in den gasförmigen Zustand übergeht.“ Dadurch wird die Beschichtung zwar dünner, aber die Wand bleibt intakt. Das Schmelzen der Beschichtung würde die Wandeigenschaften dagegen drastisch verschlechtern.

Kohlenstoff bläst das Kernfeuer nicht aus

Doch der Kohlenstoff hat noch einen weiteren Vorteil: Sein Kern besitzt nur sechs Protonen. Die geringe Protonenzahl dieser Stoffe zieht Elektronen nur mit einer vergleichsweise schwachen Kraft an. Kohlenstoffatome, die ins heiße Plasma gelangen, verlieren deshalb sofort ihre Elektronen. Damit ist aber die

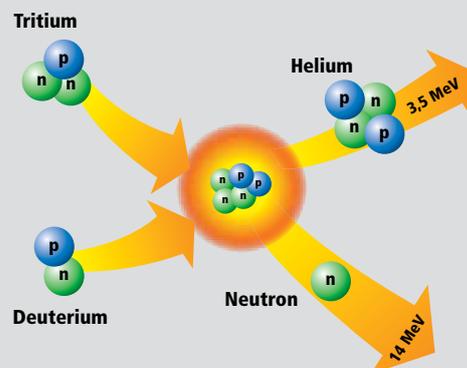
Was ist Kernfusion?

> Während in den herkömmlichen Kernkraftwerken Atomkerne gespalten werden, werden bei der Kernfusion je zwei Kerne miteinander verschmolzen. Die auf den ersten Blick zueinander gegensätzlichen Prozesse arbeiten nach dem gleichen physikalischen Grundprinzip: Gemäß Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ verwandeln sie Masse in Energie.

Bringt man mehrere Kernteilchen zusammen, beispielsweise zwei Protonen und zwei Neutronen, dann hat das Endprodukt – in dem Fall ein Heliumkern – weniger Masse als die Summe der vier Einzelteilchen. Der Grund ist die Bindungsenergie, die freigesetzt wird, wenn die Teilchen sich verbinden.

Eisenatome haben pro Kernteilchen die größte Bindungsenergie. Bei Atomen, die im Periodensystem der Elemente eine niedrigere Protonenzahl haben als Eisen, kann man Energie durch Kernfusion gewinnen, bei Atomen mit mehr Protonen durch Kernspaltung. Die effektivste Kernfusion (siehe Grafik oben) ist das Verschmelzen von Deuterium – schwerem Wasserstoff – und Tritium, das auch als überschwerer Wasserstoff bezeichnet wird.

Im Zentrum der Sonne, wo diese Fusionsreaktion neben anderen abläuft, herrscht eine Temperatur von etwa 10 Millionen Grad Celsius und ein Druck, der mindestens dem 200 Milliardenfachen des Erdatmosphärendrucks entspricht. Da dieser hohe Druck im Labor nicht zu erreichen ist, wird in Kernfusionsreaktoren zum Ausgleich eine Temperatur von 100 Millionen Grad benötigt – was hohe Anforderungen an die Wandbeschichtung der Reaktoren stellt.



Wie bei der Kernspaltung hat man es auch bei der Kernfusion mit Radioaktivität zu tun. Jedoch entfällt die umstrittene Endlagerung von Abfallprodukten. Das radioaktive Tritium wird erst im Reaktor aus Lithium gewonnen und dort sofort verbraucht. Das Endprodukt der Kernfusion, Helium, ist nicht radioaktiv. Dagegen bilden sich in den Wandmaterialien wegen des starken Neutronenbeschusses radioaktive Stoffe. Durch geeignete Wahl der Materialien lässt sich die Halbwertszeit dieser Stoffe aber auf 100 Jahre begrenzen, so dass sie zwischengelagert und wiederverwendet werden können.

Ein weiterer Unterschied zur Kernspaltung: Bei der Kernfusion sind keine Kettenreaktionen möglich. Eine Störung im Reaktor führt schlimmstenfalls zum Erlöschen der Fusion. <

Dieser „Brennstoff“ ersetzt 1000 Liter Öl: Zwei Liter Wasser enthalten 75 Milligramm Deuterium. Einige Kilogramm Gestein enthalten 225 Milligramm Lithium, aus dem im Reaktor Tritium entsteht.





Die Steuerzentrale von TEXTOR. Von hier aus lenken und überwachen die Wissenschaftler die Fusionsexperimente.

größte Gefahr für das Erlöschen des Kernfeuers gebannt. Denn es sind in erster Linie die gebundenen Elektronen von Verunreinigungsatomen, die das Plasma abkühlen, indem sie laufend Energie aufnehmen und als Licht abstrahlen.

Allerdings hat Kohlenstoff auch einen Nachteil: Weil er zu den leichteren Elementen gehört, können die heißen Plasmateilchen Kohlenstoffatome relativ einfach aus der Wandbeschichtung herausschlagen. Für sich allein betrachtet würde dies eine Abtragungsrates der Wandbeschichtung von mehreren Metern pro Betriebsjahr zur Folge haben. Die entsprechenden Wandkomponenten eines Fusionskraftwerkes müssten demzufolge in extrem kurzen Abständen ausgewechselt werden.

Aber innerhalb des Reaktors geht zum Glück nichts verloren. Der aus der Wand gelöste

Kohlenstoff lagert sich auch wieder auf der Wand ab. Erfreulicherweise ist die Ablagerungsrate genau dort am höchsten, wo auch der meiste Kohlenstoff abgelöst wird – wodurch die Lebensdauer der Wandbeschichtung erheblich verlängert wird.

Konzept für 2015

Einer der Jülicher Plasmaphysiker, Dr. Volker Philipps, leitet die europäische Arbeitsgruppe „Plasma-Wand-Wechselwirkung“, in der die europäische Forschung auf diesem Gebiet koordiniert wird. „Unser Konzept für den internationalen Testreaktor ITER steht“, sagt Philipps. ITER soll im Jahr 2015 seinen Betrieb im französischen Cadarache aufnehmen. Die bei ITER gewonnenen Erkenntnisse sollen dann den Bau des ersten Fusionskraftwerkes ermöglichen.

Drei Materialien sind für die Wandbeschichtung von ITER vorgesehen. „Für die Stellen, die am

meisten belastet sind, nehmen wir Graphit, die Stellen mit mittlerer Belastung werden mit Wolfram beschichtet und der Rest mit Beryllium“, erläutert Philipps. Erstmals wird die Kombination dieser drei Materialien ab 2008 im europäischen Testreaktor JET getestet, der im britischen Culham steht. „Unser Beitrag aus Jülich werden Wolfram-Kacheln sein, deren Eigenschaften wir ebenfalls am TEXTOR untersuchen“, sagt Samm. Wolfram hat gegenüber Graphit eine niedrigere Erosionsrate, trägt aber zur Abkühlung des Plasmas bei, falls einzelne Atome aus den Kacheln herausgeschlagen werden. „Die kombinierten TEXTOR- und JET-Experimente werden uns dabei helfen, die Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen“, so Samm.

Dabei ist ein noch zu lösendes Problem, dass der wieder abgelagerte Kohlenstoff radioaktives Tritium aus dem Plasma einfängt und an der Wand anreichert. Aus Sicherheitsgründen ist dies nicht tolerierbar. Die Wand müsste regelmäßig gereinigt oder ersetzt werden. Deshalb prüfen die Jülicher Wissenschaftler sehr genau, wo noch Graphit und wo schon Wolfram verwendet werden kann.

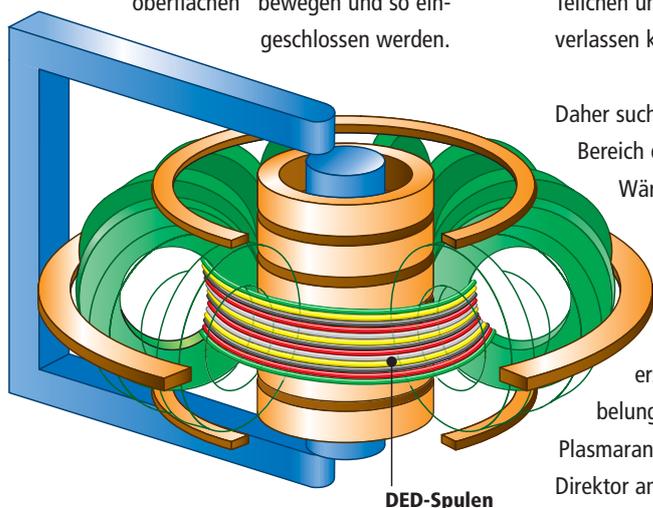
Ständig rechnen die Jülicher Forscher die an TEXTOR gewonnenen Erkenntnisse auf die Verhältnisse von ITER hoch. Dabei geht es immer wieder um die kostenentscheidende Frage: Wie lange hält die Wand durch, bevor sie ausgewechselt werden muss?

Axel Tillemans

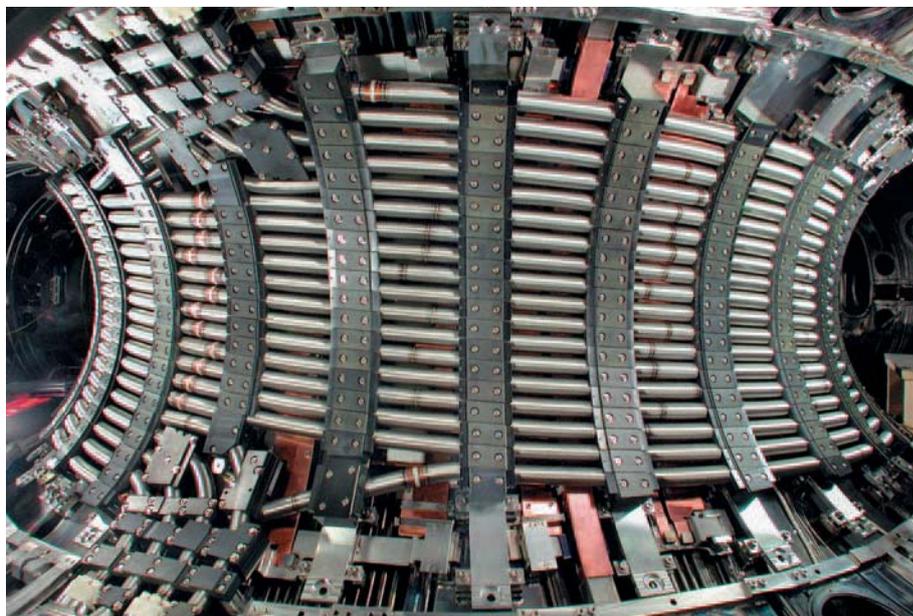
Der chaotische Schutzengel

Die Wand zukünftiger Kernfusionsreaktoren muss vor der „vollen Wucht“ des 100 Millionen Grad heißen Plasmas geschützt werden. Dabei macht es gar nichts, wenn der „Schutzengel“ etwas chaotisch ist. Im Gegenteil: Ein gewisses Maß an Chaos in den Magnetfeldern, die das Plasma einschließen, sorgt dafür, dass die Hitze auf größere Wandbereiche verteilt wird.

In Fusionsexperimenten wie dem Jülicher TEXTOR und auch dem zukünftigen internationalen Testreaktor ITER füllt das Plasma das Innere eines Torus aus – also ein autoreifenförmiges Volumen. Ein Magnetfeld sorgt dafür, dass sich die elektrisch geladenen Plasmateilchen auf ineinandergeschichteten „Reifenoberflächen“ bewegen und so eingeschlossen werden.



Die DED-Spulen verlaufen spiralförmig an der inneren Toruswand des Jülicher Fusions-experiments.



Die Spulen des Dynamischen Ergodischen Divertors (DED), mit dem die Magnetfeldlinien am Plasmarand chaotisch verwirbelt werden können.

Die Temperatur in der Mitte des „Reifenschlauchs“ ist am höchsten – dort findet auch die Kernfusion statt – und es gibt ein Wärmegefälle nach außen. Der Wärmeeinbruch ist nicht perfekt. Das soll er auch gar nicht sein: Teilchen und Energie müssen das Plasma verlassen können.

Daher sucht man sich einen bestimmten Bereich der Wand aus, auf den man den Wärmefluss konzentriert und schützt ihn mit speziell beschichteten Platten. Jülicher Wissenschaftler experimentierten im TEXTOR zusätzlich mit einem neuartigen Konzept. „Dabei erzeugen wir eine chaotische Verwirbelung der Magnetfeldlinien am äußeren Plasmarand“, erläutert Prof. Robert Wolf, Direktor am Institut für Plasmaphysik. So treffen die Magnetfeldlinien die Platten nicht dauernd an der gleichen Stelle: Plasmateilchen und Wärmefluss verteilen sich gleichmäßiger.

Eine ergänzende Rotation des Magnetfeldes verstärkt diesen Effekt noch. Hervorgerufen wird die chaotische Verwirbelung durch ein zusätzliches Störmagnetfeld, den Dynamischen Ergodischen Divertor.

Dieser „Schutzengel“ vollführt noch mehr gute Taten: Er schirmt den Plasmarand vor dem Eindringen von Verunreinigungen ab, die aus der Wand herausgeschlagen werden und das Kernfeuer „löschen“ können. Künftig könnte er außerdem helfen, ein weiteres Problem zu lösen: Aufgrund von Instabilitäten verlässt die Energie das Plasma nicht kontinuierlich, sondern trifft die Wand pulsartig. „Wir haben die berechtigte Hoffnung, dass wir mit der Verwirbelung des Plasmarandes einen gleichbleibenderen Energiefluss erreichen können, der für die Wand weniger belastend wäre“, sagt Wolf.

Axel Tillemans