

((Phy1125))

HEISSES PLASMA

FUSIONSFORSCHUNG

## ***Plasmaeinschluss in Tokamak und Stellarator***

### **Wie bändigt man heißes Plasma?**

*Mit ITER wird in Cadarache in Frankreich das erste Fusionsexperiment gebaut, das einen Nettogewinn an Energie erzeugen soll. Auf dem Weg dorthin waren zahlreiche physikalische Herausforderungen zu meistern. Wir stellen einige von ihnen vor – und noch ungelöste Aufgaben.*

SIBYLLE GÜNTER | KARL LACKNER

Bereits 1957 hatte das Technikmagazin *hobby* eine klare Vorstellung vom Aussehen eines zukünftigen Fusionskraftwerks. Es würde einen Kilometer lang sein und hundert Meter Durchmesser haben (Abbildung 1, [1]). Ein einziger dieser Giganten könnte die gesamten Vereinigten Staaten mit elektrischem Strom versorgen. Die Innereien beschrieb *hobby* etwas weniger klar, was verständlich ist. Schließlich unterlag damals die Fusionsforschung in den USA, Großbritannien und der Sowjetunion noch einer rigorosen Geheimhaltungspolitik, die diese Staaten allerdings bald aufgaben. 1958 berichteten alle in der Fusionsforschung aktiven Länder in der Genfer Konferenz „Peacefull Uses of Nuclear Energy“ sehr ausführlich über ihre Programme.

Seitdem sind rund fünfzig Jahre vergangen. Das Bild aus *hobby* und die Berichte der Genfer Konferenz zeigen, wie vage damals die Vorstellungen noch waren, und welche Vielfalt von unterschiedlichen Konzepten es gab. Ein 25 Jahre dauernder „Darwinscher“ Selektionsprozess reduzierte die Vielzahl der magnetischen Einschlusskonzepte auf zwei – relativ eng verwandte – Konzepte, die überlebt haben: Tokamak und Stellarator. Allein die Zahl von mehr als 200 verschiedenen Experimentieranlagen verdeutlicht die Vielfalt der Probleme, die der Einschluss eines 100 Millionen Grad heißen, ionisierten Gases aufwirft. Den Auslesprozess bis zu den zwei überlebenden Techniken beschreibt [2] sehr ausführlich und anekdotenreich. Innerhalb der Tokamaklinie mündete die Selektion letztlich im Großexperiment ITER (Abbildung 2), das nun im französischen Cardarache gebaut wird.

Die grundlegenden Methoden des magnetischen Einschlusses und die Charakteristika der beiden heute noch verfolgten alternativen Linien Tokamak und Stellarator hat bereits Isabella Milch kürzlich in Physik in unserer Zeit vorgestellt [3]. Wir wollen hier etwas detaillierter auf einige aktuelle Fragestellungen der Fusionsforschung eingehen. Insbesondere wollen wir aufzeigen, welche Überlegungen die Auslegung von ITER bestimmten und welche Probleme auf dem Weg zu einem Fusionsreaktor noch zu lösen sind.

## **Dynamik und Stationarität im Tokamak**

Im Tokamak ist der Plasmastrom essentiell für den magnetischen Einschluss. Er wird üblicherweise wie in der Sekundärwindung eines Transformators induziert. Damit impliziert er ein wesentliches Problem des Tokamaks, denn dieser kann nur gepulst getrieben werden. Es gibt allerdings noch einen zusätzlichen Strom, der über einen thermoelektrischen Effekt zustande kommt. Diesen Strom treibt der Druckgradient zwischen Zentrum und Rand des Plasmas an. Er trägt zum magnetischen Einschluss des Plasmas bei und hilft damit, wiederum den Druckgradienten aufrecht zu erhalten. Für diesen Bootstrap-Strom wäre „Münchhausen-Strom“ eine sinngemäße Übersetzung, denn in gewisser Weise kann sich der Tokamak darüber wirklich an den Haaren aus dem Sumpf ziehen. Dieser Strom bietet nämlich prinzipiell die Möglichkeit, Tokamaks stationär zu betreiben. Das ist aber ein sehr langfristiges Ziel und auch nicht zwingend für einen Reaktor erforderlich.

Problematischer ist es, dass der Plasmastrom selbst und die großen Druckunterschiede zwischen Plasmazentrum und -rand auch zu Energiequellen werden können, die Instabilitäten im Plasma antreiben. Im Extremfall kann dies den Zusammenbruch des Plasmastroms zur Folge haben. Das bedeutet im Tokamak natürlich gleichzeitig die Zerstörung der für den Plasmaeinschluss erforderlichen Magnetfeldkonfiguration und somit den Verlust des Plasmas. Eine solch extreme Instabilität tritt allerdings nur auf, wenn man Operationsgrenzen überschreitet. Im Experimentierbetrieb geschieht das noch relativ häufig, weil die Forscher der Ehrgeiz treibt, das untersuchte Gebiet möglichst weit auszudehnen. Das ist vergleichbar mit der Formel-1: Im Rennbetrieb testet man Grenzen aus, im Straßenverkehr bleibt man weit darunter, profitiert aber von der Renntechnik.

Auch im Reaktorbetrieb wird man einen ausreichenden Abstand zu den im Experimentierbetrieb ausgeloteten Operationsgrenzen halten. Allerdings kann man sich nicht zu weit von ihnen entfernen. Schließlich will man das einschließende Magnetfeld optimal ausnutzen, um zu einem in ökonomischer Hinsicht attraktiven Fusionsreaktor zu gelangen. Daher können bereits für die angestrebten Reaktorparameter Instabilitäten auftreten. Diese führen aber entweder nur zu tolerierbaren kleinen Störungen im Plasmaeinschluss – oder wachsen so langsam an, dass man sie durch aktive Maßnahmen kontrollieren kann.

Ein Beispiel ist die Feedback-Kontrolle der Lage und Form des Plasmas. Instabile Verschiebungen oder Verformungen der Plasmasäule, die in Mikrosekunden anwachsen könnten, werden von einer zeitlichen Variation des Magnetfeldes begleitet. Daher induzieren sie Spiegelströme in den Wänden des Plasmagefäßes. Entsprechend der Lenzschen Regel sind diese ihrer Ursache entgegengerichtet und bremsen das Anwachsen der Störung. Die Spiegelströme zerfallen zwar wegen des endlichen elektrischen Widerstandes der Wände innerhalb von Millisekunden. Doch diese Zeit reicht, um mit einem Feedbacksystem kontrollierend eingreifen zu können. Dieses System erzeugt mit zusätzlichen Spulen ein gerade passendes Magnetfeld, welches das Plasma in seine Ausgangslage und Ausgangsform zurückdrängt.

Im Tokamak wird der maximal erreichbare Plasmadruck bei gegebenem Magnetfeld üblicherweise durch den Bootstrap-Strom selbst begrenzt. Da dieser durch den Druckgradienten getrieben wird, führt jede lokale Abflachung des Druckprofils zu einem „Loch“ im Strom. Dies verändert aber wiederum in seiner Umgebung das lokale Magnetfeld. Die Wärmeisolierung sinkt und lässt somit das Druckprofil noch flacher werden. Eine einmal auftretende Druckabflachung verstärkt sich also selbst. Dem kann man jedoch gezielt entgegen wirken: Durch Einstrahlung von Mikrowellen, die in Resonanz mit der Kreisbewegung der Elektronen im Magnetfeld sind, kann man sehr lokal einen elektrischen

Strom treiben. So lässt sich mit nahezu chirurgischer Präzision das Loch im Bootstrap-Strom gezielt flicken.

Es gibt sogar Plasma-Instabilitäten, die hilfreich für den Tokamakbetrieb sein können. Das sind meist periodisch auftretende Störungen in einem räumlich sehr begrenzten Bereich. Es gibt sie beispielsweise am Plasmarand. Dort werfen sie periodisch Verunreinigungen aus, die von der Wand ins Plasma eindringen. Man kann sie allerdings nur mit geringer Amplitude tolerieren. Diese lässt sich aber kontrollieren, indem man die Instabilität ausreichend häufig aktiv anregt. Das gelingt durch den Einschuss kleiner, gefrorener Wasserstoffkugeln. Diese lösen zuverlässig – wie ein Herzschrittmacher – die Instabilität mit einer festen Taktrate aus.

### **Knackpunkt Wärmeisolierung**

Für einen Fusionsreaktor braucht man eine extrem gute Wärmeisolierung, die etwa zehnmal besser als diejenige von Styropor sein muss. Er soll eine Temperatur von etwa 100 Millionen Grad aufrechterhalten können, dabei entspricht die Leistungsdichte im Plasma nur einem Hundertstel derjenigen eines Automotors oder eines Spaltreaktors. Als Maßzahl für diese Isolation verwendet man die Energieeinschlusszeit: Innerhalb dieser Zeit würde nach Abschalten der Heizung die Plasmatemperatur um einen Faktor  $e$  absinken. Für einen Fusionsreaktor sind mindestens fünf Sekunden Einschlusszeit nötig.

Nach einfachen Schätzungen sollte es wenigstens für den Tokamak kein Problem sein, diese Einschlusszeit zu erreichen. Aus der Sicht eines Einzelteilchens ist der Einschluss durch das Magnetfeld im Tokamak nämlich fast perfekt. Die Teilchen folgen im inhomogenen Magnetfeld zwar nicht exakt den Magnetfeldlinien. Diese spannen aber, wie in allen modernen magnetischen Fusionsanlagen in sich geschlossene Flächen auf, die ineinander geschachtelt sind. So lässt sich eine ausreichende Wärmeisolierung erzielen [3]. Wegen der Axisymmetrie der Tokamak-Anordnung bleiben die Teilchen immer in einer endlichen Entfernung von ihrer ursprünglichen magnetischen Fläche und kehren sogar periodisch zu ihr zurück.

Im Prinzip können Stöße zwischen den Plasmateilchen diese perfekte Isolation zerstören. Sie sind aber in den heißen, dünnen Fusionsplasmen sehr selten, weil der Stoßquerschnitt für Coulomb-Stöße quadratisch mit der Teilchenenergie abnimmt. Diese Überlegungen waren eine der Ursachen für den Optimismus in den Anfängen der Fusionsforschung. Die sich daraus theoretisch ergebende Wärmeisolierung wäre völlig ausreichend, um bereits mit heutigen Fusionsanlagen Energie zu erzeugen.

Allerdings zeigten die Experimente einen viel größeren Energieverlust, dessen Ursache ist eine turbulente Durchmischung des Plasmas ist. Turbulenz besteht aus vielen, dauernd zerfallenden und sich wieder neu bildenden Wirbeln verschiedener Größe. Dadurch durchmischt sie das Plasma besonders effektiv. In Fusionsexperimenten ist der wesentliche Antrieb der Turbulenz der steile Abfall der Plasmatemperatur: Auf nur zwei Metern Entfernung herrscht ein Temperaturunterschied von mehr als 100 Millionen Grad. Dieser Temperaturabfall treibt Instabilitäten an, die letztlich zu Turbulenz mit charakteristischen Wirbelgrößen im Zentimeter-Bereich führen.

Die theoretische Beschreibung von turbulenten Vorgängen ist heute noch eine der größten Herausforderungen der theoretischen Physik. Sie muss nämlich die Dynamik von Wirbeln auf den unterschiedlichsten Größenskalen zugleich beschreiben (siehe auch Physik in unserer Zeit

2006, 37(5), 212). Daher überfordert eine völlig rigorose Behandlung von Turbulenz selbst modernste Höchstleistungsrechner.

Mit Hilfe von Turbulenzrechnungen ist es deshalb immer noch nicht möglich, eine Vorhersage über die erreichbare Wärmeisolierung in einer Fusionsanlage zu machen – und damit letztlich über die notwendige Größe eines Fusionsreaktors. Bei der Auslegung von ITER war man auf empirische Vorhersagen auf Basis experimenteller Beobachtungen angewiesen. Die Abhängigkeit der Energieeinschlusszeit von der Tokamakgröße sollte unter anderem wesentlich durch die Veränderung der mittleren Wirbelgröße der beteiligten Turbulenz bestimmt sein.

Prinzipiell kann man sich zwei charakteristische Längenskalen vorstellen, an denen sich die Wirbelgröße orientieren könnte. Die eine ist die größte Skala in Form der Plasma-Abmessungen im Reaktor, als Alternative bietet sich die kleinste Skala in Gestalt der Gyrationradien der Plasmateilchen an. Je nachdem würde die Energieeinschlusszeit bei gegebenem Magnetfeld und konstanter Plasmatemperatur entweder quadratisch oder kubisch mit dem Durchmesser der Fusionsanlage steigen. Die Klärung dieser Frage erforderte also Experimentieranlagen von stark unterschiedlicher Größe (Abbildung 3). Kleine Anlagen waren dabei allerdings nur bedingt nützlich, da sie durch Wandeffekte dominiert werden. Die wichtigsten (und teuersten) Datenpunkte kamen von dem derzeit größten Tokamak, JET (Joint European Torus) in Culham (England). JET hat etwa den halben Durchmesser des geplanten ITER-Experiments. Dieser Tokamak ermöglicht schon kurze Fusionsexperimente, allerdings noch ohne Nettogewinn in der Energiebilanz.

Die Ergebnisse solcher Skalierungsexperimente waren zunächst nicht gerade ermutigend. Danach hätte ein Fusionsreaktor etwa doppelt so groß geplant werden müssen, wie wir das heute können. Ökonomisch wäre das reichlich unattraktiv gewesen. Der Durchbruch gelang 1982 am Garching Tokamak-Experiment ASDEX (Axially Symmetric Divertor Experiment): Eine neuartig gestaltete Plasmaoberfläche verbesserte die Wärmeisolation plötzlich um einen Faktor Zwei. Im Unterschied zu bisherigen Experimenten wurde hier das Plasma nicht mehr direkt durch materielle Wände begrenzt. Stattdessen wurde es durch zusätzliche Spulen so verformt, dass der Kontakt zwischen Plasma und Wand nur in einem speziell dafür vorgesehenen Bereich, der Divertor-Kammer [3], stattfand (Abbildung 4).

Ursprünglich wurde dieses Konzept entwickelt, um möglichst wenige Verunreinigungen in das Plasma gelangen zu lassen, die der Beschuss mit energiereichen Plasmateilchen aus der Wand frei setzt. Die Anordnung erlaubt aber offenbar auch die Ausbildung von Strömungen in der Nähe des Plasmarandes, deren Geschwindigkeiten stark mit dem Abstand vom Rand variieren. Diese verscherten Strömungen sind in der Lage, die turbulenten Wirbel im Plasma zu verformen und zu zerreißen, was den turbulenten Transport drastisch reduziert. Daher kann in diesem Bereich eine „Transport-Barriere“ entstehen, in der die Wärmeisolierung viel besser ist. Alle späteren Tokamak-Anlagen nutzten diesen Effekt aus, auch JET wurde entsprechend umgebaut. Auch die Geometrie von ITER basiert auf den Garching Ergebnissen.

Die Planung von ITER beruht auf empirischen Skalierungsexperimenten. Trotzdem hat sich auch das theoretische Verständnis des turbulenten Transports deutlich weiterentwickelt, unter anderem auch dank moderner Höchstleistungsrechner (Abbildung 5). Man hat herausgefunden, dass über weite Bereiche des Plasmas der turbulente Energietransport durch Instabilitäten bestimmt wird. Sie treten immer dann auf, wenn der Temperaturabfall eine bestimmte Schwelle überschreitet. Der dann einsetzende turbulente Transport begrenzt das

Verhältnis der Temperaturen im Plasmazentrum und am Rand auf einen bestimmten Wert, unabhängig von der Stärke der Plasmaheizung.

Die Situation im Tokamak ist damit den Prozessen sehr ähnlich, die den Temperaturverlauf in der Erdatmosphäre bestimmen. Auch dort gibt es einen maximalen vertikalen Abfall der Temperatur: Fällt die Temperatur mit der Höhe schneller, kommt es zu einer Schichtungs-Instabilität und in deren Folge zu einer turbulenten Durchmischung der Atmosphäre. Weil die Zentraltemperatur im heißen Plasma also nur um einen festen Faktor größer sein kann als die Randtemperatur, kommt letzterer natürlich eine besondere Rolle zu. Eine Transportbarriere am Plasmarand erlaubt mit ihrer verbesserten Isolation eine höhere Randtemperatur und kann so wesentlich zur Verbesserung des Einschlusses beitragen (Abbildung 6). In Abbildung 6 ist statt der für die Fusion eigentlich entscheidende Iontemperatur der Elektronendruck (Elektronentemperatur  $\times$  Dichte) dargestellt. Die Elektronentemperatur über die von den Elektronen emittierten Strahlung sehr genau messbar, die aus ihrer Kreisbewegung im Magnetfeld resultiert. In einem Fusionsreaktor werden Elektronen- und Iontemperatur gleich sein.

### ***Nicht voll gegen die Wand***

Der Kontakt des Plasmas mit der Wand ist ein ganz heikler Punkt, und zwar nicht wegen der Sicherheit. Die Wand übersteht den Kontakt wegen der geringen Energie im Plasma ohne größeren Schaden. Dagegen würden schon kleinste Mengen Wandmaterial im Plasma dessen Temperatur dramatisch absenken und die Fusionsreaktionen zum Erlöschen bringen. Das Plasma kann nämlich außer durch Wärmeleitung auch durch Strahlung Energie verlieren. Dafür sind vor allem nicht vollständig ionisierte Teilchen verantwortlich, die in Spektrallinien strahlen. Im Plasmazentrum können das nur Verunreinigungen sein, denn Wasserstoff und auch das Fusionsprodukt Helium sind bei den dort herrschenden Temperaturen von etwa 100 Millionen Grad längst vollständig ionisiert.

Damit nicht zu viele Verunreinigungen in das Zentrum des Plasmas geraten, darf es also nicht durch eine materielle Wand begrenzt werden. Stattdessen wird der im zukünftigen Kraftwerksbetrieb unvermeidliche Kontakt zwischen Plasma und Wand nur in der Divertor-Kammer zugelassen. Durch Beschuss mit schnellen Plasmateilchen entstehende Verunreinigungen können aus der Divertor-Kammer nur schwer entlang der Feldlinien in das Hauptplasma gelangen. Außerdem kann man in dieser Kammer die Plasmadichte stark erhöhen. Das erlaubt ein effektives Abpumpen der Verunreinigungen und der Fusionsasche Helium. Bei gleich bleibendem Plasmadruck sinkt bei zunehmender Dichte zugleich die Temperatur, was in der Kammer eine effektive Kühlung durch Abstrahlung von Energie über Linienstrahlung leichter Elemente ermöglicht. Dies reduziert die sonst kritische Wärmebelastung in jenen Zonen, wo das Plasma auf materielle Strukturen trifft.

Dem Wandmaterial kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Prinzipiell hat man dabei die Wahl zwischen Elementen niedriger Ordnungszahl wie Graphit oder Beryllium, die schon bei geringen Temperaturen voll ionisiert sind und daher aus dem Plasmazentrum nicht abstrahlen. Die Alternative sind sehr schwere Elemente, weil sie auch bei starkem Beschuss mit energiereichen Plasmateilchen kaum abgetragen werden. Aus heutiger Sicht erscheint daher Wolfram für einen zukünftigen Fusionsreaktor als erste Wahl, weil der Abtrag von Wandmaterial im Dauerbetrieb nicht tolerierbar ist. Am Garching ASDEX Upgrade wird daher bereits jetzt eine Wolfram-Wand verwendet.

Im Gegensatz zum Graphit, wie er bei bisherigen Experimenten verwendet wird, stellt uns Wolfram in direktem Kontakt mit dem Plasma vor neue Herausforderungen. Es wird zwar kaum abgetragen, aber völlig lässt sich sein Eindringen in das Plasma nicht verhindern. Da es aus dem Plasmazentrum stark Energie abstrahlen würde, darf seine Konzentration nicht über 0,005 % steigen. Um dies zu erreichen, kann man sich die sonst geschmähte Turbulenz nutzbar machen: Eine starke zentrale Heizung der Elektronen im Plasma facht nämlich auch einen turbulenten Teilchentransport nach außen an. In Kombination mit der Steuerung der Instabilitäten am Plasmarand, die den Zufluss von Wolfram über den Plasmarand nach innen begrenzen, lässt sich die Wolfram-Konzentration im Plasma in akzeptablen Grenzen halten. Da Wolfram bei niedrigen Temperaturen kaum strahlt, verliert man allerdings bei Aufgabe von Graphit die willkommene Kühlung des Divertorplasmas, weil die effektive Strahlung des Kohlenstoffs entfällt. Das kann man jedoch über die gezielte Zufuhr von Verunreinigungen ausgleichen, die genau in dem gewünschten Temperaturbereich stark strahlen.

### **Der Stellarator**

Im Tokamak ist der Plasmastrom essentiell für den magnetischen Einschluss. Er ist aber auch für zwei wesentliche Nachteile des Tokamaks verantwortlich: Der induktive Stromtrieb erlaubt wie schon gesagt keinen echt stationären Betrieb, und der Plasmastrom kann zusätzliche Instabilitäten antreiben.

Auf den Plasmastrom kann man verzichten, wenn ausschließlich äußere Spulen die zum Einschluss erforderlichen Magnetfelder erzeugen. Auf diesem Prinzip beruht der Stellarator. Er erzwingt allerdings auch die Aufgabe der Axisymmetrie, denn nur so bilden die Feldlinien der von außen erzeugten Magnetfelder toroidal geschlossene Flächen. Die Bestimmung der dazu nötigen Spulenformen und der sich einstellenden magnetischen Flächen im Plasma (Plasmagleichgewicht) ist außerordentlich komplex und gelingt erst dank moderner Hochleistungscomputer. Daneben hatte der Stellarator lange ein weiteres schwerwiegendes Handicap, denn im Einschluss schneller Teilchen und heißer Plasmen war er dem Tokamak weit unterlegen. Erst in den 1980er-Jahren entdeckte man Stellaratorkonfigurationen, die – in Abwesenheit von Turbulenz – einen vergleichbar guten Einschluss ermöglichen.

Das Prinzip des Stellarators ist zwar älter als der Tokamak, steht jedoch wegen der zwischenzeitlichen Rückschläge heute auf einer früheren Entwicklungsstufe. Der Konvergenzprozess zu einer optimalen Konfiguration ist noch nicht so weit fortgeschritten, das er ein so ambitioniertes Experiment wie ITER rechtfertigen würde. Beim Stellarator kann das Plasmagleichgewicht mit verbesserten Eigenschaften theoretisch in mehreren Formen realisiert werden, die sich qualitativ stark unterscheiden.

Eines dieser Unterscheidungsmerkmale betrifft den Bootstrap-Strom, der im Prinzip auch im Stellarator eingesetzt werden kann. Er ist zwar für den Einschluss nicht nötig, doch er würde es erlauben, mit einfacher geformten Spulen auszukommen. Diese Variante soll das amerikanische National Compact Stellarator Experiment (NCSX) testen, das gegenwärtig in Princeton im Bau ist. Durch passende Magnetfeld- und Spulenformen kann man aber auch den Bootstrap-Strom unterdrücken. Dadurch ändert sich die Form des Magnetfeldes weniger, wenn der Druck des Plasmas beim Aufheizen steigt. Das Plasma sollte folglich ruhiger bleiben und weniger geregelt werden müssen. Dieses Konzept verfolgt der in Greifswald entstehende Stellarator Wendelstein 7-X.

### **ITER als letztes Experiment**

Der Tokamak ITER führt ein völlig neues Element in die Plasmaphysik ein, die thermonukleare Selbstheizung des Plasmas. In bisherigen Experimenten blieb der Einfluss der Fusionsheizung auf die Energiebilanz des Plasmas relativ gering. Das gilt selbst für JET, der immerhin schon 17 MW Fusionsleistung erreichte. In ITER wird die Heizung des Plasmas erstmals von den fusionserzeugten  $\alpha$ -Teilchen dominiert werden. Dies ist Neuland, denn die Heizleistung kann nicht mehr direkt von außen durch einen Knopf geregelt werden. Sie wird ausschließlich durch die Parameter des Plasmas selbst bestimmt.

Vor allem erwarten wir aber einen völlig neuen Effekt, wenn der Heizprozess des Plasmas durch das Abbremsen der  $\alpha$ -Teilchen geschieht. Er sollte neue Instabilitäten in Form einer umlaufenden Wellenbewegung des Magnetfeldes anregen. Schnelle Teilchen, die sich mit fast gleicher Geschwindigkeit wie die Welle fortbewegen, können einen Teil ihrer Energie an die Welle abgeben. Dabei werden sie radial nach außen transportiert. Eine solche „resonante“ Wechselwirkung erlebt jeder Wellenreiter, der auf dem Abhang einer Welle surft.

In bisherigen Experimenten spielt dieser Effekt noch keine wesentliche Rolle. Zur Heizung werden schnelle Wasserstoff-Atome von außen eingeschossen, die aber zu langsam für eine resonante Wechselwirkung sind und kaum Instabilitäten auslösen. Durch Kernfusion produzierte  $\alpha$ -Teilchen sind dagegen wesentlich energiereicher und sollten so diese Wellen im Magnetfeld anregen. Dabei ist noch unklar, wie stark diese Wellen die  $\alpha$ -Teilchen aus dem Zentrum umverteilen und daher die Plasmaheizung beeinträchtigen werden. Das kann nur das Experiment klären.

ITER soll aber auch der Zwischenschritt zum ersten Demonstrationskraftwerk DEMO sein, das dann erstmals Energie ins Netz einspeisen soll. Daher werden in ihm auch viele Technologien getestet, die bei den bisherigen Experimentalanlagen nicht – oder nicht in dieser Kombination – benötigt wurden. Dazu gehören supraleitende Magnete, die Berücksichtigung der intensiven Neutronenstrahlung durch Abschirmung und der Einsatz strahlungsresistenter Komponenten. Die Anlage ist auch erstmals auf ausschließlich ferngesteuerte Service- und Reparaturmöglichkeiten ausgelegt.

ITER eröffnet auch ein neues Kapitel in der Brennstoffaufbereitung. In Sternen können unter dem enormen Druck vier Kerne des leichten Wasserstoffs, Protonen, über Zwischenschritte zu einem Helium-Kern verschmelzen. Kraftwerke müssen dagegen eine andere Fusionsreaktion zwischen Deuterium- und Tritium-Kernen nutzen. Diese läuft auch bei dem außerordentlich niedrigen Druck ab, bei denen sich ein heißes Plasma noch in technisch herstellbare Magnetfelder einschließen lässt. Allerdings erfordert diese Reaktion auch mindestens das Zehnfache der Temperatur von 10 Millionen Grad, wie sie im Sterninneren herrscht. Eine Brennstoffkomponente, das Deuterium, ist im natürlichen Anteil von schwerem Wasser überall im Wasser reichlich vorhanden. Tritium kommt hingegen natürlich praktisch nicht vor, weil der  $\beta$ -Strahler mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren zerfällt. In geringen Mengen entsteht es als Abfallprodukt in den mit Schwerwasser moderierten Kernkraftwerken des kanadischen CANDU-Typs, was den Bedarf von ITER decken wird.

Ein Fusionskraftwerk muss sich jedoch selbst mit Tritium versorgen. Das ist möglich, denn die fusionserzeugten Neutronen können es aus Lithium in speziellen Wandelementen erbrüten. Das hat einen weiteren Vorteil: Das radioaktive Tritium entsteht direkt im Reaktor und wird dort auch zu Helium-Asche verbrannt. Dieser Brennstoff-Kreislauf soll an ITER technologisch entwickelt werden.

## **Was fehlt noch?**

Parallel zum Bau von ITER geht an den bestehenden Tokamak-Anlagen die Suche nach optimalen Betriebsszenarien weiter. Eine wesentliche Zielstellung ist der stationäre Tokamakbetrieb. Er wäre zwar für ein Kraftwerk nicht unbedingt erforderlich. Auch ein induktiv getriebener Tokamak könnte wegen des geringen Plasmawiderstandes und dem deshalb sehr kleinen Stromverlust in „Pulsen“ arbeiten, die mehrere Stunden lang dauern. Doch der stationäre Betrieb wäre aus technologischen und ökonomischen Gründen wünschenswert.

Einen sehr attraktiven Ersatz für den induktiv getriebenen Plasmastrom bietet der Bootstrap-Strom, der jedoch einen sehr hohen Plasmadruck erfordern würde. Durch Transportbarrieren, die inzwischen nicht nur am Plasmarand, sondern auch im Plasmazentrum gezüchtet werden konnten, könnte dieses Ziel erreichbar werden. Immerhin hat man auf diese Weise an mittelgroßen Tokamak-Experimenten wie ASDEX Upgrade bereits für kurze Momente die Zündtemperatur von 100 Millionen Grad erzielen können.

Im Vergleich zur Auslegung von ITER wird die Plasmatheorie bei der Planung des ersten Demonstrationsreaktors DEMO eine viel größere Rolle spielen. Nicht nur für die Optimierung von Tokamaks, sondern ganz besonders auch von Stellaratoren sind die theoretischen Werkzeuge inzwischen viel besser geworden, auch dank wachsender Rechnerleistung. Das Ziel einer theoretischen Ab-initio-Beschreibung des Plasmaverhaltens erscheint inzwischen durchaus realistisch.

Auf dem Weg zu einem Demonstrationskraftwerk wird neben der Physik die Technologie immer wichtiger. Vor allem müssen für einen einsatzfähigen Reaktor neue Wandmaterialien entwickelt werden. Eine andere Frage ist der zukünftige Umgang mit Radioaktivität. Im geschlossenen Kreislauf werden radioaktive Isotope nur als zeitweiliges Zwischenprodukt in Form von Tritium auftreten, das wieder verbrannt wird. Die Strahlenbelastung der Umwelt entsteht daher vor allem durch die radioaktive Aktivierung der Wandstrukturen in der Umgebung des Plasmas. Diese ist durch Materialwahl steuerbar: Eisen, Chrom, Titan, Vanadium und Siliziumkarbid werden zum Beispiel nur wenig aktiviert oder bilden nur kurzlebige Isotope.

Die Aufgabe an die Materialforscher besteht nun darin, aus derartigen Materialien Legierungen und Verbundstoffe zu entwickeln. Sie müssen nicht nur gute thermomechanische Eigenschaften besitzen, sondern diese auch unter der intensiven Bestrahlung mit Neutronen für mehrere Jahre behalten. Vor allem letzterer Nachweis ist eine sehr zeitaufwendige Aufgabe, für die eine eigene Bestrahlungsquelle entwickelt werden soll.

## **Zusammenfassung**

*Ein Fusionsreaktor muss das heiße Plasma magnetisch einschließen. Der Druckunterschied zwischen dem Zentrum und dem Rand des Plasmas kann dabei zahlreiche Instabilitäten treiben. Große Instabilitäten können die magnetische Einschlusskonfiguration verschlechtern oder ganz zerstören. Sie lassen sich allerdings inzwischen in toroidalen Einschlussanlagen wie Tokamak und Stellarator vermeiden oder kontrollieren. Kleinskalige Instabilitäten verursachen eine turbulente Durchmischung des Plasmas. Daher bestimmen sie die Energieverluste. Sie lassen sich jedoch heute ausreichend begrenzen. Das ermöglicht in Anlagen von der Größe des ITER-Experiments ein thermonukleares Brennen, das sich schon fast selbst erhält.*

## Stichworte

Tokamak, Stellarator, ASDEX Upgrade, ITER, Wendelstein 7-X, DEMO, Bootstrap-Strom, Plasmainstabilität, Turbulenz, Divertor, Separatrix, Tritium, Kernfusion.

## Literatur

- [1] Hobby, Das Magazin der Technik **1957**, 8, 68.
- [2] C. M. Braams und P.E. Stott, Half a Century of Magnetic Confinement Fusion Research, Institute of Physics Publishing, Bristol 2002.
- [3] I. Milch, Physik in unserer Zeit **2006**, 37(4), 170.

## Die Autoren

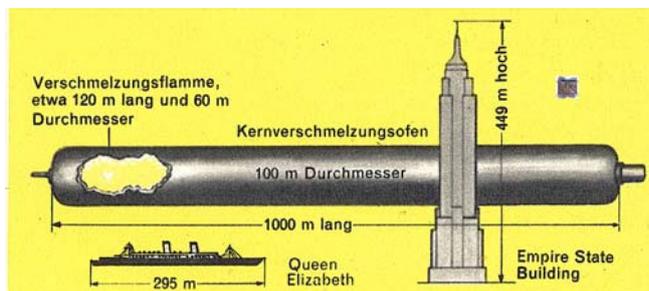
Sibylle Günter hat in Rostock Physik studiert, promoviert und sich nach einem Forschungsaufenthalt in Maryland in theoretischer Physik habilitiert. Seit 1996 arbeitet sie am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik IPP in Garching. Als Direktorin leitet sie dort mit Karl Lackner den Bereich Tokamakphysik. Sie ist apl. Professorin an der Universität Rostock und Honorarprofessorin an der TU München.

Karl Lackner studierte Physik und promovierte in Innsbruck. Nach Forschungsaufenthalten in Pasadena und Frascati kam er 1972 an das IPP. Von 2000 bis 2002 leitete er EFDA, das European Fusion Development Agreement, unter dem die Europäische Zusammenarbeit zu ITER und der Betrieb von JET durchgeführt wird. Er ist Direktor am IPP und lehrt als Honorarprofessor an der Universität Innsbruck.

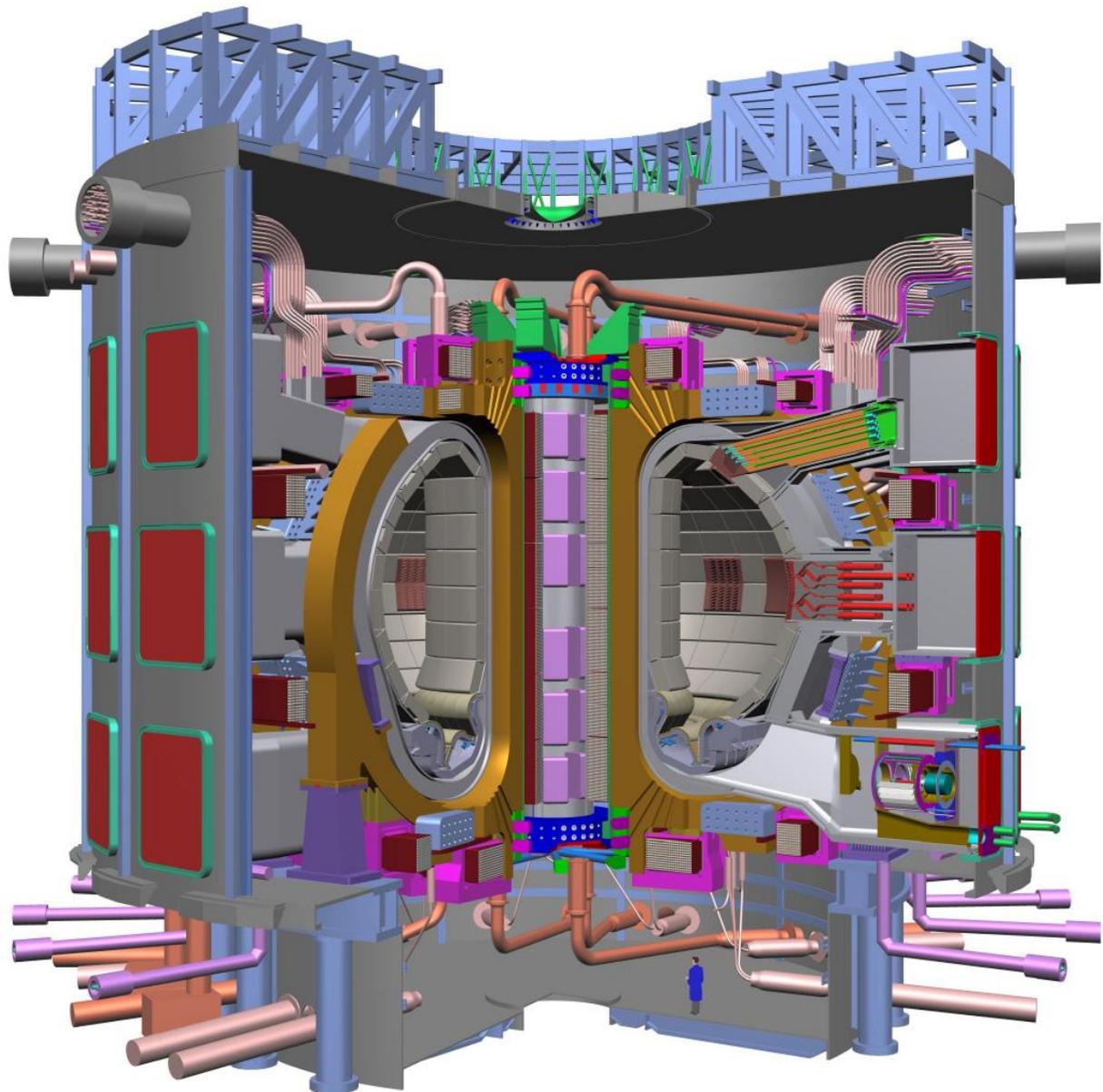
## Anschrift

Prof. Dr. Sibylle Günter, Prof. Dr. Karl Lackner, Leitung Tokamak Physics Division, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Boltzmannstr. 2, D-85748 Garching. sig@ipp.mpg.de

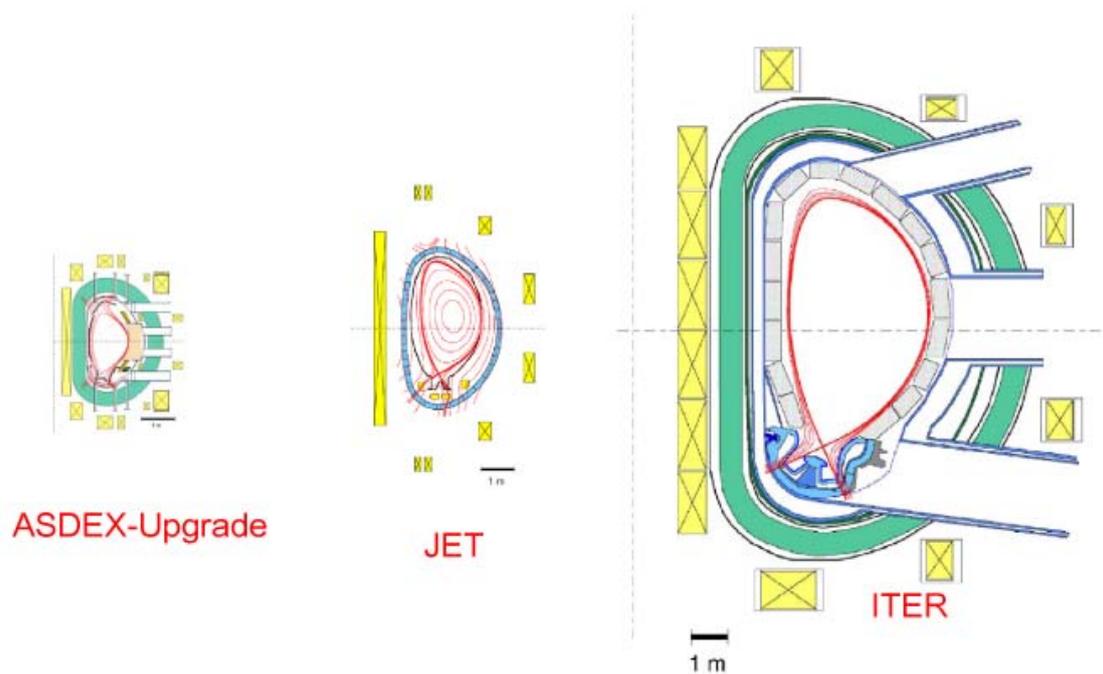
## ((Bildunterschriften))



**Abb.1** Ein Fusionsreaktor, wie ihn sich das hobby-Magazin 1956 vorstellte (Grafik: [1]).

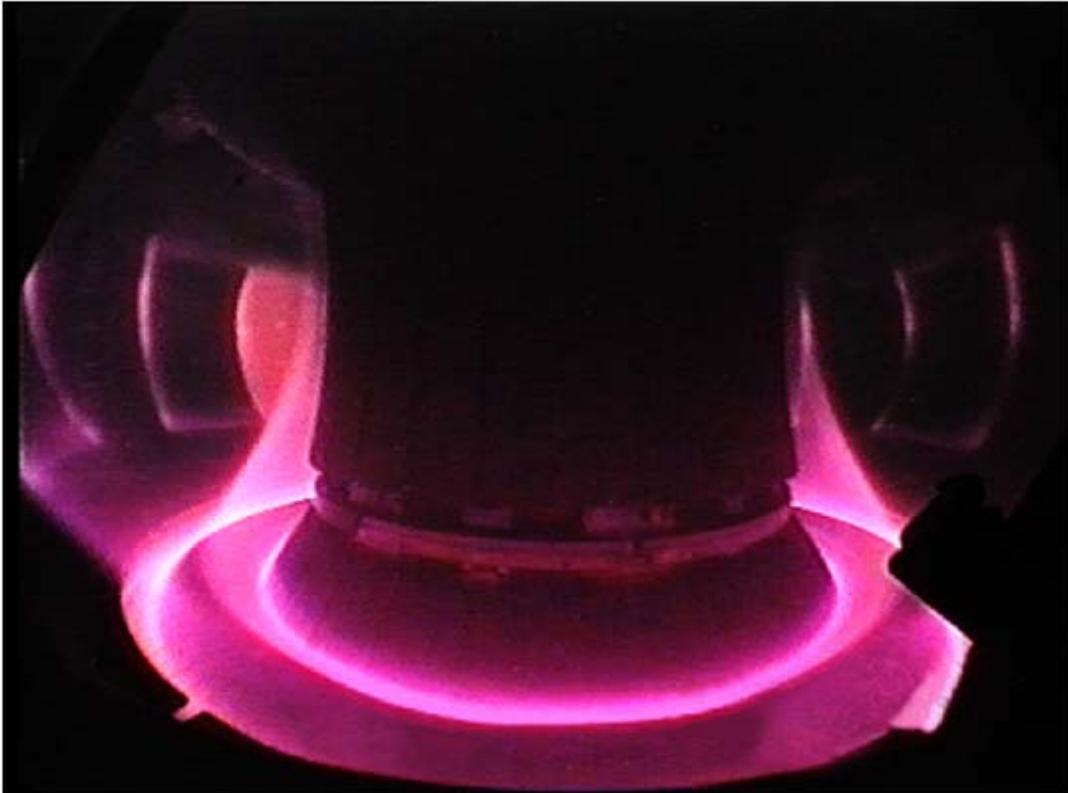


**Abb. 2** Das Schnittbild des etwa 30 m hohen ITER zeigt unter anderem das torusförmige Plasmagefäß mit einigen Einbauten, die verschiedenen Magnetfeldspulen und den umgebenden Kryostaten für die supraleitenden Spulen, die mit flüssigem Helium gekühlt werden (Grafik: ITER).



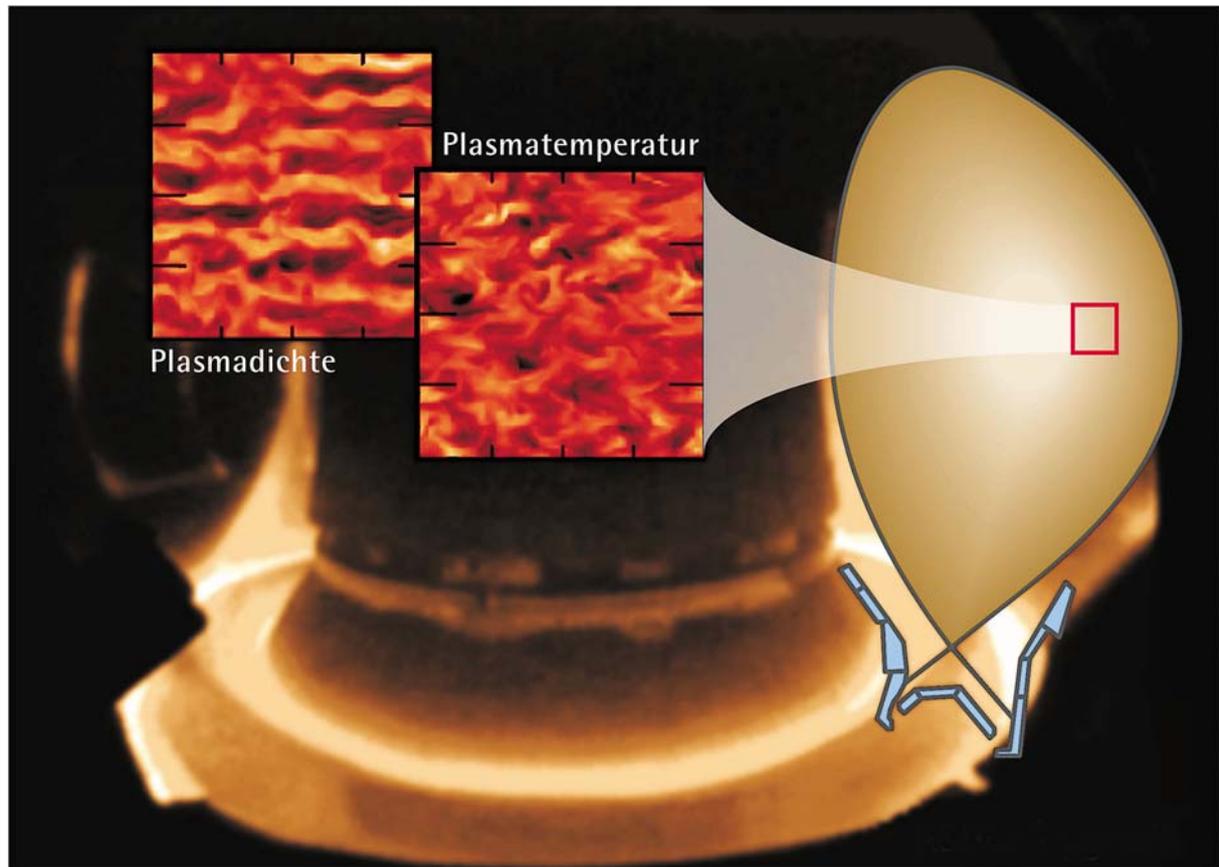
### ABB. 3 TOKAMAK-QUERSCHNITTE

Maßstabgetreuer Vergleich der Querschnitte von Tokamaks, die ITER ähnlich sind, mit magnetischen Flussflächen (rot). Innerhalb einer Trennfläche namens Separatrix bilden sie geschlossene Tori, außerhalb werden sie in eine getrennte Kammer, den Divertor, geleitet.



---

**Abb. 4** Foto des Plasmas in ASDEX Upgrade in Garching. Nur der Plasmarand in der Nähe der Separatrix leuchtet im sichtbaren Wellenlängenbereich.



#### ABB. 5 COMPUTERSIMULATION DER PLASMATURBULENZ

Simuliert wird ein in der Querschnittsgrafik rechts eingezeichneter, quadratischer Ausschnitt (rot) des Plasmas. Das Rechengebiet entspricht einem Bündel von Magnetfeldlinien, das sich schraubenförmig um das hell ange deutete Plasmazentrum windet. Die Momentaufnahmen der errechneten Temperatur- und Dichteverteilung zeigen starke Fluktuationen, die im zeitlichen Mittel Energie aus dem Plasmazentrum weg transportieren.

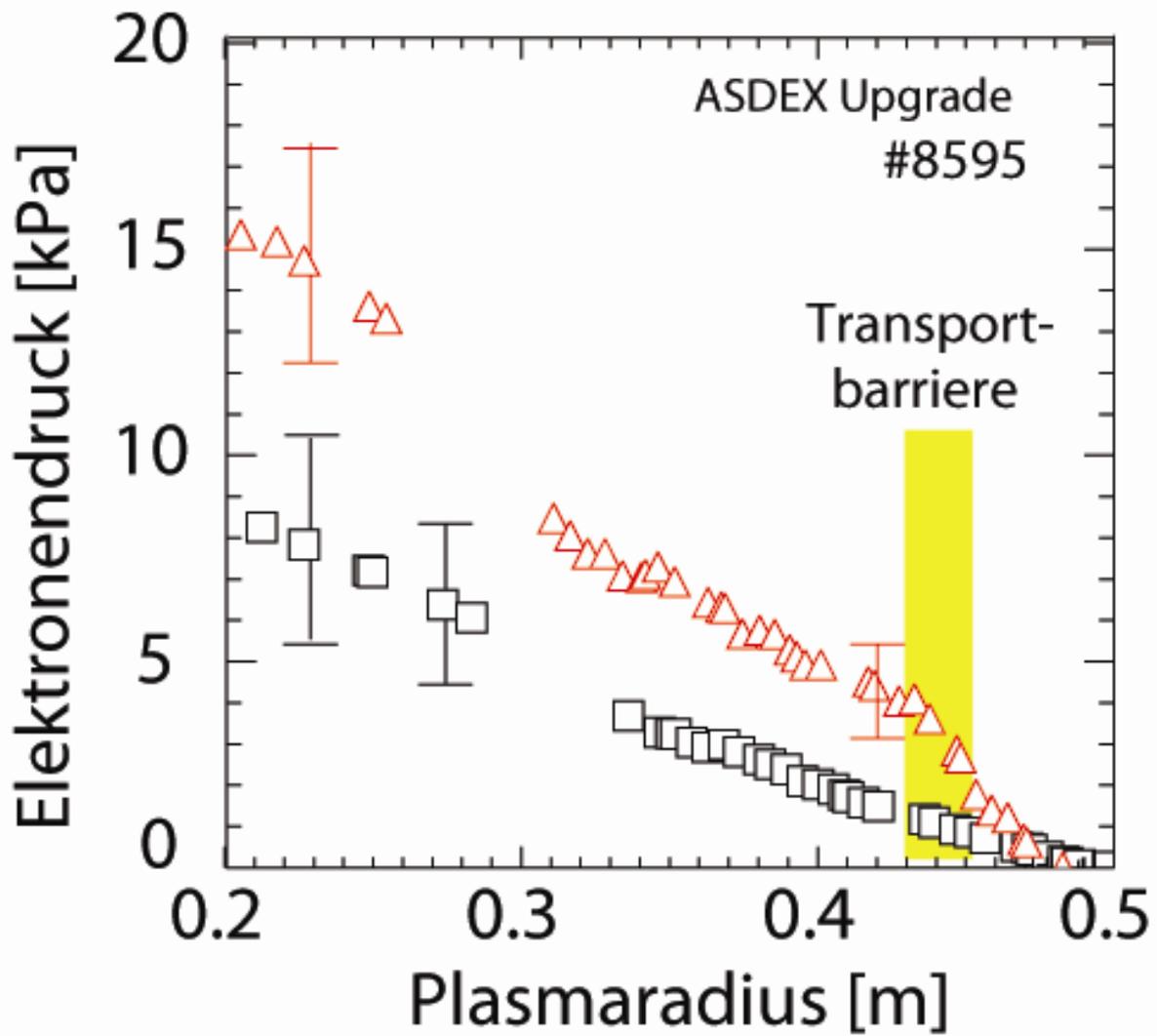


ABB. 6 TRANSPORTBARRIERE

Der an ASDEX Upgrade gemessene Elektronendruck in seinem Verlauf vom Plasmazentrum zum Plasmarand, für Entladungen mit (rote Dreiecke) und ohne (schwarze Quadrate) Transportbarriere am Rand.