

# PRESSEINFORMATION

5/85

31. Oktober 1985

## SONNENTEMPERATUREN IM LABOR

Ergebnisse der Plasmaheizexperimente im IPP / Ziel: 100 Millionen Grad

Um den energiespendenden Prozeß der gesteuerten Kernfusion in einem Plasma anzufachen, bei dem Atomkerne des Wasserstoffs zu Helium verschmelzen, müssen die Fusionspartner zunächst auf enorme Zündtemperaturen gebracht werden. Im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching bei München werden daher in den Fusionsexperimenten ASDEX und WENDELSTEIN VII-A verschiedene Methoden der Plasmaheizung untersucht, über deren Wirksamkeit nun neue Ergebnisse vorliegen.

## Neutralteilchenheizung

In einem künftigen Reaktor muß der Fusionsbrennstoff - ein ionisiertes Gas ("Plasma") aus den beiden Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium - auf mindestens 100 Millionen Grad aufgeheizt werden. Erst bei dieser Zündtemperatur - sowie bei ausreichender thermischer Isolation und Dichte des Plasmas - setzen genügend viele Fusionsreaktionen ein, so daß die frei werdende Fusionsenergie die Heizenergie überwiegt und den Brennvorgang selbständig aufrecht erhalten kann.

Nennenswerte Energiemengen wurden am IPP bislang vor allem mit der sogenannten "Neutralteilchenheizung" in das Plasma übertragen. Dazu schießt man schnelle neutrale Wasserstoffteilchen in das Plasma ein, das von starken Magnetfeldern im Innern eines ringförmigen Vakuumgefäßes festgehalten wird. Über Zusammenstöße geben die Wasserstoffteilchen ihre Energie an die Plasmateilchen weiter und heizen sie auf. Zwei Teilcheninjektoren pumpen auf diese Weise in 0.4-Sekunden-Pulsen Leistungen bis zu 4.2 Megawatt in das ASDEX-Plasma. Damit konnten bei niedrigen Plasmadichten Temperaturen bis zu 55 Millionen Grad erzeugt werden - bereits ein Mehrfaches der Temperatur im Inneren der Sonne.

Im Prinzip wäre die Neutralteilchen-Injektion daher geeignet, einen künftigen - notwendigerweise wesentlich größeren - Fusionsreaktor aufzuheizen.

Dem stand jedoch bislang ein technisches Problem entgegen: Für steigende Maschinengröße werden immer höhere Teilchengeschwindigkeiten nötig, um bis ins Zentrum des Plasmas vorzustoßen. Der erforderliche Teilchenstrahl kann dann mit den gegenwärtigen technischen Mitteln nicht mehr wirtschaftlich hergestellt werden.

Neueste Experimente an ASDEX zeigen nun aber, daß auch langsame, weniger tief in das Plasma eindringende Neutralteilchen die gewünschte Temperaturerhöhung hervorbringen. Anders als befürchtet, verschlechtert sich die Wärmeisolation des Plasmas hierbei nicht. Dieses unerwartete Ergebnis kann von einigem Einfluß auf kommende Heizstrategien sein: An dem europäischen Gemeinschaftsexperiment JET (Joint European Torus) in Culham/England, dem derzeit größten Fusionsexperiment in Europa, werden bereits Versuche geplant, um zu prüfen, ob das an ASDEX gefundene Ergebnis auch bei größeren Apparaturen seine Gültigkeit behält. In diesem Fall würden zur Heizung des nochmals größeren JET-Nachfolgers NET (Next European Torus) sogar Neutralteilchenstrahlen geringerer Energie ausreichen, als sie die gegenwärtig bei JET eingebauten Teilcheninjektoren liefern.

#### Hochfrequenz-Heizungen

Eine weitere am IPP angewandte Methode, Energie in das Plasmaintere zu transportieren, ist die Heizung mit Radiowellen. Bei bestimmten hohen Frequenzen können die Plasmateilchen - ähnlich wie Bratwürstchen im Mikrowellengrill - Energie aus dem elektromagnetischen Feld einer eingestrahnten Welle entnehmen.

Elektronen und Ionen bewegen sich nämlich auf schraubenförmigen Bahnen mit jeweils fester Umlauffrequenz ("Zyklotronfrequenz") um die Feldlinien der einschließenden Magnetfelder. Stimmt die Frequenz der eingestrahnten Radiowelle mit der Umlauffrequenz der Plasmateilchen überein, so wird deren Bewegung resonanzartig verstärkt und das Plasma insgesamt aufgeheizt. Das jüngste Hochfrequenz-Heizexperiment des IPP, das seit November 1984 betrieben wird, arbeitet mit Radiowellen der "Ionen-Zyklotronfrequenz", die die Bewegung der Plasmaionen anregen. Den Experimentatoren stehen zwei Sender zur Verfügung, die in 10 Sekunden langen Pulsen mit Frequenzen zwischen 30 und 115 Megahertz Leistungen von 2.7 Megawatt in das Plasma einstrahlen

können - und damit die Leistung der stärksten Radio- und Fernsehsender weit übertreffen.

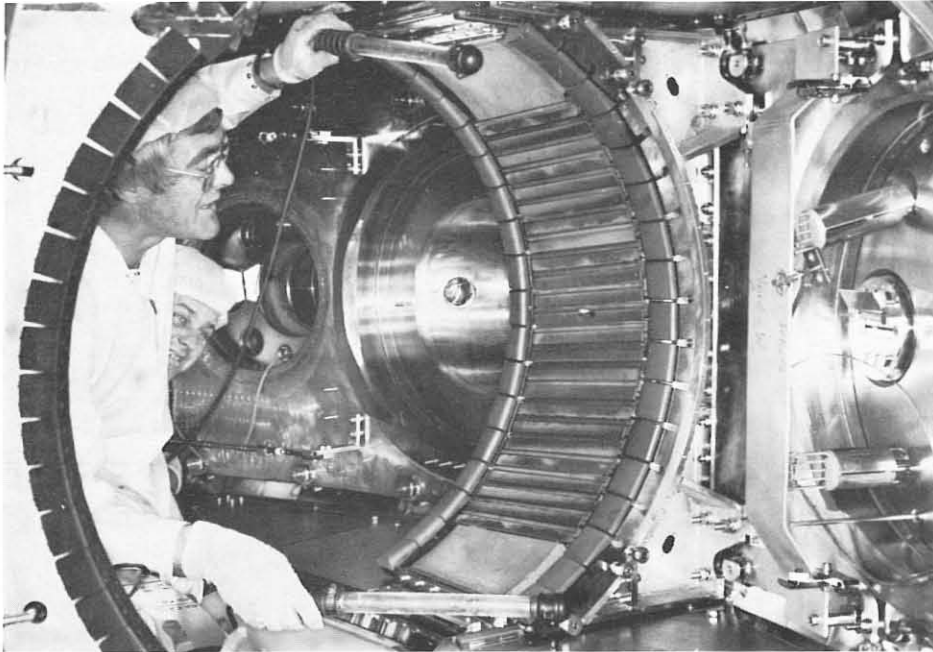


Abbildung 1: Blick in das ringförmige Plasmagefäß des Fusionsexperimentes ASDEX. Zum Aufheizen des Plasmas werden über die große gebogene Antenne (rechts) Radiowellen der Ionen-Zyklotronfrequenz eingestrahlt.

Die Eigenschaften der neuen Heizmethode wurden an ASDEX bislang bei 1-Sekunden-Pulsen und 67 Megahertz, der doppelten Ionen-Zyklotronfrequenz, getestet. Die ersten Ergebnisse sind ermutigend: Es stellt sich heraus, daß die Ionen-Zyklotronheizung die bewährte Neutralteilchenheizung unter bestimmten Plasmabedingungen an Effizienz noch übertrifft, das heißt mit der gleichen Heizleistung eine größere Menge Energie im Plasma abladen kann, falls die Anfangstemperatur des Plasmas genügend hoch ist. Deshalb hat sich eine Kombination beider Heizverfahren als besonders erfolgreich erwiesen. Das Plasma wird zunächst mit Neutralteilchen vorgeheizt und anschließend die Hochfrequenzheizung zugeschaltet. Bereits mit Leistungen von je 1.6 Megawatt Neutralteilchen- und Ionenzyklotronheizung wurden so bei mittleren Plasmadichten Temperaturen bis zu 30 Millionen Grad erreicht. Höhere Temperaturen sind bei der vollen zur Verfügung stehenden Leistung zu erwarten.

Wie jede Zusatzheizung ist auch die Ionen-Zyklotronheizung von störenden Effekten begleitet: Während des Heizens nimmt die Plasmaverunreinigung zu und die Wärmeisolation des Plasmas ab. Umso erfreuter waren die Garching Physiker, als sie den 1982 an ASDEX bei starker Neutralteilchenheizung entdeckten Umschlag in einen Plasmazustand guter thermischer Isolation ("H-Regime") auch in der Kombination mit Ionen-Zyklotronheizung noch

beobachten konnten. Die weiteren Untersuchungen werden sich daher vor allem mit den physikalischen Bedingungen für das H-Regime und der Kontrolle der Verunreinigungen beschäftigen.

Diese Arbeiten sind auch für das europäische Gemeinschaftsexperiment JET von Bedeutung, wo ähnliche Fragen auftreten werden, wenn JET seine Heizung schrittweise auf die bis 1990 vorgesehenen 25 Megawatt Leistung (10 Megawatt Neutralinjektion, 15 Megawatt Ionenzyklotronheizung) ausbauen wird. Damit könnte es erstmals möglich werden, die erforderliche Temperatur von 100 Millionen Grad zu erreichen und in den Zündbereich des Plasmas vorzudringen.

### Heizungspläne

Die bisherigen Ergebnisse zu Ionenzyklotron- und Neutralteilchenheizung an ASDEX bestätigen die Entscheidung, beide Verfahren auch zur Heizung des Nachfolgeexperiments ASDEX Upgrade zu benutzen, das 1988 in Betrieb gehen soll. In das Plasma werden dann je zur Hälfte durch Neutralinjektion und Ionen-Zyklotronwellen in 7- Sekunden-Pulsen insgesamt 12 Megawatt eingestrahlt. Mit diesen Leistungen wird es möglich, in der Plasmarandschicht reaktorähnliche Energieflüsse zu simulieren: Das Experiment hat die Aufgabe, den in ASDEX getesteten Divertor - ein System zusätzlicher Magnetspulen zur Kontrolle der Plasmaverunreinigungen, das auch in einem zukünftigen Reaktor nötig sein wird - unter Bedingungen zu untersuchen, die auch für den JET-Nachfolger NET sowie einen Fusionsreaktor zu erwarten wären.

### Hochfrequenz-Stromtreiben

An ASDEX wird neben der Ionen-Zyklotronheizung noch ein weiteres Hochfrequenzexperiment, mit Wellen der "unteren Hybridfrequenz" (1.3 Gigahertz), betrieben, die je nach Plasmadichte die Elektronen- oder die Ionenbewegung im Plasma anregen. Neben Untersuchungen zur Heizung laufen Versuche, mit diesem Wellentyp einen elektrischen Strom im Plasma zu treiben:

Fusionsapparaturen vom Typ Tokamak benötigen nämlich einen elektrischen Ringstrom zur Anfangsheizung des Plasmas und zur Erzeugung eines Magnetfeldes, das zusammen mit dem äußeren Hauptfeld das Plasma einschließt. Üblicherweise wird dieser Strom über einen Transformator im Plasma induziert. Die gepulste Arbeitsweise des Transformators zwingt jedoch auch dem Tokamak den technisch ungünstigen Pulsbetrieb auf.



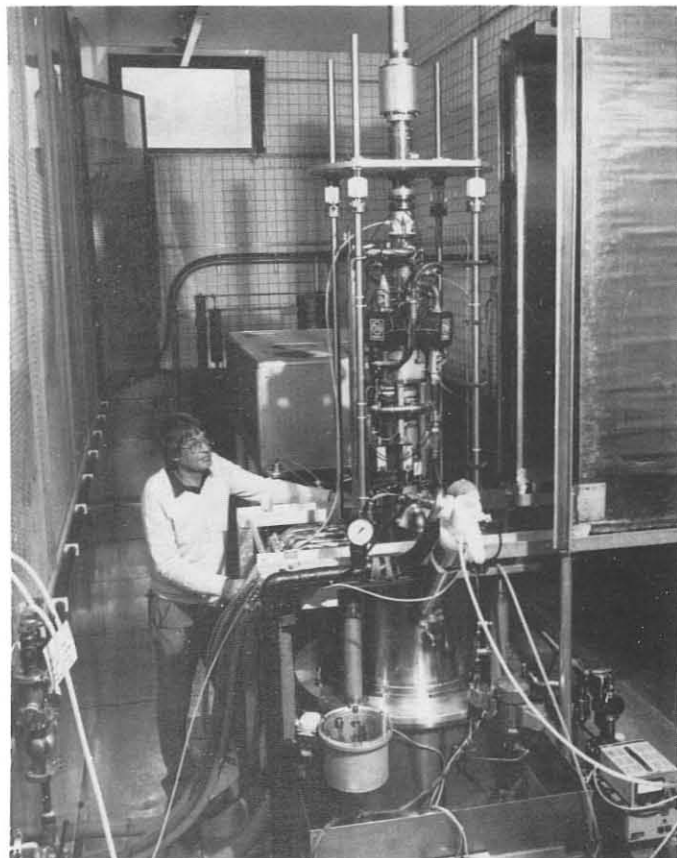
Hier bietet das Hochfrequenz-Stromtreiben eventuell einen Ausweg: Über eine Antenne werden Radiowellen der unteren Hybridfrequenz gerichtet in das Plasma eingestrahlt, auf denen die Elektronen wie "Wellenreiter" nach vorne beschleunigt werden. Mit einer Hochfrequenz-Leistung von 450 Kilowatt kann auf diese Weise der gesamte Plasmastrom von 400 Kiloampere für eine Sekunde aufrechterhalten werden. Bei stärkerer Wellenheizung wird sogar zusätzlich Energie in den Primärkreis des Transformators zurückgespeist. Man kann den Transformator also für den nächsten Puls aufladen, ohne unterdessen das Plasma zu verlieren. Damit könnte kontinuierliches Arbeiten auch für einen Tokamak möglich werden - eine günstige Randbedingung für einen späteren Reaktorbetrieb.

Ein zusätzlicher Vorteil des hochfrequenz-getriebenen Stromes wurde erst kürzlich in Garching entdeckt: Die für die Stabilität des Tokamaks wichtige Stromverteilung im Plasma ist nun - anders als beim Transformatorbetrieb - nicht mehr an die Temperaturverteilung im Plasma gekoppelt, sondern kann unabhängig von der Heizung beeinflusst werden. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, das Stabilitätsverhalten eines Tokamaks zu verbessern.

#### Elektronen-Zyklotronheizung am Stellarator

Die europaweit höchsten Frequenzen werden am Stellaratorexperiment WENDELSTEIN VII-A, der zweiten Großapparatur des IPP, zur Plasmaheizung benutzt. Mit einer

Abbildung 2: Mikrowellen zur Heizung des WENDELSTEIN-Plasmas mit der in Westeuropa höchsten Heizfrequenz von 70 Gigahertz erzeugt dieses 200-Kilowatt-Gyrotron. Der untere Teil des in Sonderanfertigung für das IPP hergestellten Senders liegt in einem mit flüssigem Helium auf minus 269 Grad Celsius abgekühlten supraleitenden Magneten. Über den rohrförmigen Wellenleiter oben werden die Mikrowellen in das WENDELSTEIN-Plasma eingespeist.



Frequenz von 70 Gigahertz koppeln diese "Elektronen- Zyklotron-Wellen" an die Kreisbewegungen der Plasmaelektronen an. Sie erfüllen dabei eine doppelte Aufgabe: Sie können das WENDELSTEIN-Plasma sowohl aus neutralem Wasserstoffgas erzeugen und damit den sonst erforderlichen Plasmastrom ersetzen, als auch wirksam heizen. Bisher wurden Elektronentemperaturen bis zu 25 Millionen Grad erreicht.

Die hochfrequenten Wellen werden in einem 200-Kilowatt-Sender (Pulsdauer 0.1 Sekunden), einem sogenannten Gyrotron, erzeugt. Bau und Betrieb des leistungsstarken Höchstfrequenzsenders stellt extreme ingenieurmäßige Anforderungen und ist technologisches Neuland - auch für die Herstellerfirma. Ebenso neuartig sind die zum Übertragen der hohen Mikrowellenleistungen nötigen Wellenleiter, die vom Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem IPP entwickelt wurden.

Nachdem sich Sender und Heizung an WENDELSTEIN VII-A bewährt haben, wurden für das Nachfolgeexperiment WENDELSTEIN VII-AS, das gegen Ende 1986 in Betrieb gehen wird, vier weitere Sender mit einer Pulsdauer von 3 Sekunden bestellt. Hier ist dann eine Mischheizung zusammen mit Neutralteilchen- und Ionen-Zyklotron-Heizung geplant.

Auf der Senderseite extremen technologischen Aufwand erfordernd, hat die hohe Frequenz der Elektronen-Zyklotron-Wellen jedoch erhebliche Vorteile für den Benutzer: Zum Einkoppeln in das Plasma ist keine Antenne nötig, Plasmaverunreinigungen treten kaum auf und die Wellen sind leicht zu bündeln. Vor allem aber kann die Absorption der Wellenenergie präzise auf ein eng begrenztes, frei wählbares Gebiet im Plasma konzentriert werden: So lassen sich die lokale Temperaturverteilung im Plasma und damit die wichtigen Wärmetransportigenschaften gezielt beeinflussen. Hierin liegt nach Einschätzung der Experimentatoren die große zukünftige Bedeutung der Elektronen-Zyklotron-Heizung.

Isabella Milch

Anmerkung der Redaktion:

Dieser Text steht Ihnen zur beliebigen Auswertung auch ohne Namensnennung zur Verfügung. Reproduktionsfähige Abzüge der Fotos erhalten Sie unter Tel. Nr. (089) 3299-288.