

Neutralteilchen- und Hochfrequenz-Heizungen

ECKEHARDT SPETH, JEAN-MARIE NOTERDAEME, VOLKER ERCKMANN
HEINRICH LAQUA, FRITZ LEUTERER

Die Fortschritte der Fusionsforschung sind nicht zuletzt auf wirkungsvolle Methoden der Plasmaheizung zurückzuführen. Seit Mitte der 1970er Jahre werden im IPP Heizungen für die Tokamak- und Stellarator-Experimente entwickelt und betrieben: Neutralteilchen-Einschuss einerseits und Einstrahlung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen andererseits.

: Neutralteilchen-Heizung

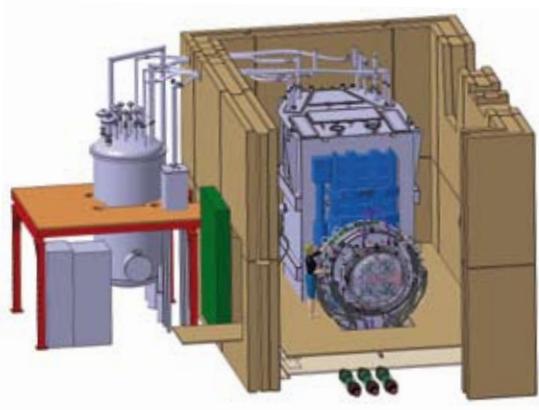
Das Prinzip der Heizung mit Neutralteilchen ist einfach!: Schnelle neutrale Atome können durch das einschließende Magnetfeld hindurch in das Plasma eindringen und werden dort durch Stöße mit den Plasmaelektronen und -ionen ionisiert. Die schnellen Ionen, die auf diese Weise erzeugt werden, sind nun im Magnetfeld ebenfalls eingeschlossen. Ihre Bewegungsenergie geben sie durch Stöße an die Plasmateilchen ab und heizen dadurch das Plasma auf. Da die schnellen Ionen einen elektrischen Strom im Plasma darstellen, kann zugleich ein Teil des Ohmschen Heizungsstroms durch Neutralteilchen-Injektion ersetzt werden.

Um einen Strahl schneller Atome herzustellen, werden – meist positiv geladene – Wasserstoff-Ionen elektrostatistisch aus einer Plasmaquelle extrahiert und dann in einem elektrischen Feld auf Energien bis zu 80 Kiloelektronenvolt pro Nukleon beschleunigt. Für Heizleistungen im Megawatt-Bereich sind extrem hohe Strahlströme von mehreren 100 Ampere notwendig. Durch Stöße mit kalten Neutralgas-Molekülen in einem so genannten Neutralisator werden die Ionen dann zu schnellen Neutralatomen



▲ Abb. 1

umgeladen. Dabei sinkt mit wachsender Energie der Anteil der Neutralteilchen am Gesamtstrahl, der Neutralisationsgrad. (Er läge bei Ionen mit Energien über 100 Kiloelektronenvolt pro Nukleon unakzeptabel niedrig: Weniger als 20 Prozent der Ionen würden neutralisiert.) Zusammen mit dem gemischten Ionen- und Neutralteilchenstrahl verlässt ein beträchtlicher Strom an kaltem Neutralgas den Neutralisator. Es muss weggepumpt



▲ Abb. 3

werden, da ansonsten die Plasmadichte und die Isotopenreinheit des geheizten Plasma nicht mehr einstellbar wäre. Die hierfür erforderlichen Pumpgeschwindigkeiten von mehreren Millionen Litern pro Sekunde liefern großflächige Kryo- oder Titangetterpumpen. Solche Systeme benötigen eine große Oberfläche von mehreren zehn Quadratmetern – mit einer der Gründe, weshalb Neutralteilchen-Injektoren groß sind.

Als 1980 im Stellarator Wendelstein 7-A zum ersten Male ein stromloses Plasma erzeugt und für kurze Zeit aufrechterhalten werden konnte, war dies damals nur durch den Einsatz von Neutralteilchenheizung möglich. Ebenfalls mit ihrer Hilfe wurde zwei Jahre später im Tokamak ASDEX ein neuer Plasmazustand mit verbessertem Plasmaeinschluss entdeckt, das H-Regime. Der seit 1991 betriebene Nachfolger ASDEX Upgrade ist mit einer starken Neutralteilchenheizung von 20 Megawatt ausgestattet, was erlaubt, im Konzert der weltweiten Konkurrenz wirkungsvoll mitzuwirken. Die drei zurzeit größten Experimente, der europäische JET in England, JT-60U in Japan und DIII-D in den USA, sind mit Heizleistungen zwischen 20 und 30 Megawatt ausgerüstet.

Für den Wirkungsgrad der Neutralteilchen-Heizung ist – wegen der Energieabhängigkeit des Neutralisationsgrades – die Strahlenergie ausschlaggebend. Sie muss umso höher sein, je größer das zu heizende Plasma ist. Will man für große Fusionsanlagen wie ITER Energien von vielen 100 Kiloelektronenvolt pro Nukleon verwirklichen, muss man auf Strahlen aus negativen Ionen ausweichen. Mit ihrem energieunabhängigen, hohen

Neutralisationsgrad von etwa 60 Prozent bieten sie einen Ausweg aus dem Wirkungsgrad-Dilemma. Seit 2003 wird daher im IPP im Rahmen mehrerer europäisch finanzierter Verträge eine Quelle für negative Wasserstoff-Ionen entwickelt. Sie ist mit einem Hochfrequenz-Plasma ausgerüstet und ist daher praktisch wartungsfrei. 2006 wurde diese IPP-Entwicklung mit dem Schrödinger-Preis ausgezeichnet.

: Radiowellen-Heizung

Radiowellen-Heizungen nutzen Hochfrequenz-Wellen in dem Frequenzbereich um die 100 Megahertz, in dem die Plasma-Ionen um die Magnetfeldlinien kreisen: deshalb werden sie auch Ionenzyklotronresonanz-Heizung (ICRF) genannt. Von einer Antenne in das Plasma eingekoppelt, transportieren verschiedene Wellentypen die Leistung vom Plasmarand ins Innere, wo die Wellenenergie von den Plasmateilchen absorbiert wird. Dabei werden Elektronen oder Ionen geheizt oder auch das Plasma anderweitig beeinflusst, etwa um Strom zu treiben oder den Transport von schnellen Teilchen zu verändern.

Die ICRF-Heizung in Stellaratoren Ende der 1950er Jahre in Princeton war einer der ersten Ansätze überhaupt, ein Plasma zu heizen. Ende der 1970er Jahre wurden in den Tokamaks TFR in Frankreich und PLT in den USA Leistungen im Megawatt-Bereich eingesetzt. Im IPP startete 1981 eine Arbeitsgruppe mit der Aufgabe, den Tokamak ASDEX und den Stellarator Wendelstein 7-A mit ICRF zu heizen.

Abb. 1: Das Plasma von ASDEX Upgrade wird mit Neutralteilchen (Box vorne rechts), Radiowellen (orange Übertragungsleitung vorne links) und Mikrowellen (silbernes Rohr hinten rechts) aufgeheizt.

Abb. 2: Beschleunigungsgitter: Mit Elektroden dieser Art werden die Teilchen auf Geschwindigkeiten bis 9000 Kilometer pro Sekunde beschleunigt.

Abb. 3: Computergrafik: Die neuartige Ionenquelle des IPP (im Vordergrund rechts), eingebaut im Teststand ELISE. Der hier erzeugte Teilchenstrahl mit einem Querschnitt von einem Quadratmeter soll eine Leistung von 1,2 Megawatt transportieren.



▲ Abb. 2

7 PLASMAHEIZUNG

Als hervorragende Ergebnisse seien erwähnt: der Nachweis, dass das an ASDEX entdeckte H-Regime nicht von der Art der Heizung abhängig ist², man Antennen einfacher gestalten kann³ und das Plasma selbst Leistung im Radiofrequenzbereich produziert⁴. Das erste H-Regime in ASDEX Upgrade wurde mit ICRF-Heizung erzielt. Die starken Veränderungen der Plasmarandschicht bei hohen Heizleistungen im H-Regime führten zwar zuerst zu Schwierigkeiten. Die zu ihrer Überwindung entwickelte Methode⁵ wird auch bei ITER angewendet werden. Das ICRF-System an ASDEX Upgrade hat mit 7,2 Megawatt eingekoppelter bei 8 Megawatt installierter Leistung einen weltweiten Rekord erzielt. Die Auskleidung der Gefäßwand mit einer Wolfram-Oberfläche hat den Betrieb der ICRF zwar erschwert, aber es gibt Lösungsansätze.

Am Stellarator Wendelstein 7-AS zeigte sich anfänglich eine ähnliche Problematik⁶, die zudem noch durch die unzureichende Absorption in der kleinen Maschine verstärkt wurde. Die Optimierung der Antenne^{7,8} führte schließlich zum Erfolg. ICRF wurde ebenso benutzt, um ein Plasma zu erzeugen und aufrecht zu erhalten⁹. Auch die Gefäßwand der Maschine wurde mit ICRF konditioniert¹⁰, ein Verfahren, das an Tokamaks einschließlich ASDEX Upgrade weiter entwickelt wurde und auch für Wendelstein 7-X und ITER vorgesehen ist. Für ITER wird im IPP in einem europäischen Verbund zudem die Radiowellen-Antenne entwickelt.

Das IPP ist intensiv am ICRF-Programm des europäischen Tokamaks JET beteiligt. Zu so verschiedenen Zwecken wie Plasmarotation, Stabilisierung von magnetohydrodynamischen Aktivitäten, Untersuchung des Transports von Elektronen und Beeinflussung des Transports von schnellen Teilchen wurde das ICRF-System erfolgreich eingesetzt¹¹. Im IPP ist der ICRF-Einsatz eng an Theoriearbeiten angebinden. So ist das Programm TORIC^{12,13}, das die Ausbreitung und Absorption der Wellen im Plasma berechnet, weltweit zur Referenz avanciert.



▲ Abb. 4

(Foto: IPP, Peter Ginter)



Foto: IPP, Anja Richter Ullmann

▲ Abb. 5

: Mikrowellenheizung

Mit 28 Gigahertz pro Tesla arbeitet die Mikrowellen-Heizung mit Hochfrequenz-Wellen in dem Frequenzbereich, in dem die Plasma-Elektronen um die Magnetfeldlinien kreisen – daher der Name Elektron-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH). Mit Mikrowellen ist eine stark lokalisierte Plasmaheizung möglich, weil sie gut fokussierbar sind und nur dort im Plasma absorbiert werden, wo die Magnetfeldstärke zur Frequenz der eingestrahlten Welle passt. Bei schräger Einstrahlung wird die Verteilung der Elektronen im Plasma asymmetrisch verzerrt, so dass sich mit Mikrowellen auch ein lokaler Plasmastrom treiben lässt.

Die ECRH-Aktivitäten begannen im IPP in den frühen 1980er Jahren am Stellarator Wendelstein 7-A. Mikrowellen einer Frequenz von 28 Gigahertz und einer Leistung von 200 Kilowatt konnten für 40 Millisekunden in das Plasma eingestrahlt werden. So wurde 1983 der erste stromfreie Plasmaaufbau und -betrieb möglich¹⁴. Die grundsätzlichen Vorteile der ECRH – einfache Einkopplung ohne plasmanahe Antennen, eine stark lokalisierte Leistungsabgabe im Plasma und die fast vollständige Leistungsabsorption – konnten bereits in den ersten Experimenten gezeigt werden. Das IPP stieß daher die industrielle Entwicklung eines Mikrowellensenders – eines so genannten Gyrotrons – bei höherer Frequenz von 70 Gigahertz an. Der Sender konnte 1984 für 100 Millisekunden 200 Kilowatt Leistung in das Plasma von Wendelstein 7-A speisen.

Große Fortschritte wurden bei der möglichst Moden-reinen Übertragung der Mikrowellen erreicht. Damit wurden 1984 in Wendelstein 7-A zum ersten Mal Experimente zur stimulierten Wärmewellenausbreitung möglich¹⁵. Am Nachfolger Wendelstein 7-AS wurde das erste flexible Einstrahlensystem mit beweglichen Antennen in der Plasmakammer eingebaut¹⁶. Das ECRH-System wurde auf 1 Megawatt Wellenleistung erweitert und bestand nun aus fünf 70-Gigahertz-Gyrotrons. Da höhere Plasmadichten nur mit höheren Frequenzen erreichbar sind, stimulierte das IPP die Entwicklung leistungsstarker 140-Gigahertz-Gyrotrons in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe und dem Institute of Applied Physics der Russischen Akademie der Wissenschaften in Nizny Novgorod. Schließlich standen für Wendelstein 7-AS vier Gyrotrons bei 140 Gigahertz

Abb. 4: Übertragungsleitung für die Radiowellenheizung im Fusionsexperiment ASDEX Upgrade.

Abb. 5: ECRH – Zehn dieser Mikrowellensender – so genannte Gyrotrons – werden an Wendelstein 7-X bei einer Frequenz von 140 Gigahertz insgesamt 10 Megawatt Heizleistung im Dauerbetrieb zur Verfügung stellen.

Abb. 6: ICRF – Radiowellensender (geöffnet) zur Heizung von ASDEX Upgrade.



▲ Abb. 6

7 PLASMAHEIZUNG



mit einer Gesamtleistung von 2,3 Megawatt und ein Gyrotron bei 70 Gigahertz mit 0,5 Megawatt zur Verfügung. Die erhöhte Leistung führte zur Entdeckung von neuen Betriebszuständen für das Plasma, wie das H-Regime an Stellaratoren¹⁷ (siehe Kapitel 3) und das „Electron-Root“-Regime¹⁸.

An Wendelstein 7-AS wurde schließlich auch die Dichtebeschränkung der Mikrowellenheizung überwunden: durch Anregung von Elektron-Bernstein-Wellen. Sowohl die Heizung als auch der Stromtrieb im überdichten Plasma wurden so zum ersten Mal gezeigt¹⁹. Die Experimente wurden eng begleitet von der theoretischen Modellierung der Strahlausbreitung und -absorption.

Die Ergebnisse bildeten die experimentelle und technologische Basis für das ECRH-System des Nachfolgers Wendelstein 7-X²⁰. Das Zehn-Megawatt-System wird vom Karlsruher Institut für Technologie gemeinsam mit dem IPP und dem Institut für Plasmaphysik der Universität Stuttgart entwickelt und gebaut. Wegen der zahlreichen physikalisch-technologischen Gemeinsamkeiten liefern die Testergebnisse des ECRH-Systems von Wendelstein 7-X auch wertvolle Beiträge für das Mikrowellen-System für den Testreaktor ITER.

(Foto: IPP, Anja Richter, Ulmann)

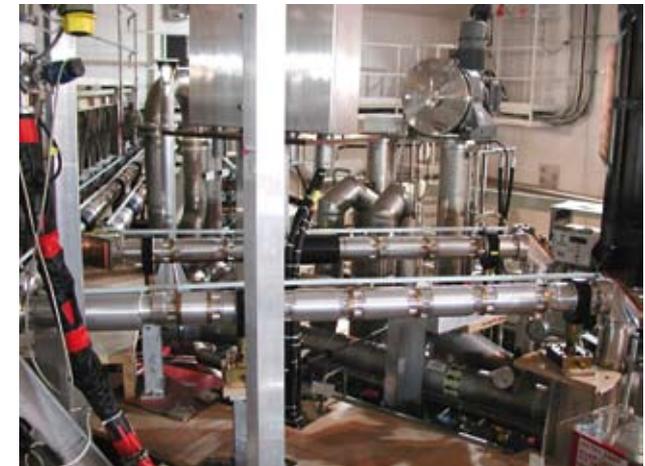
▲ Abb. 7

Ab 1993 wurde auch der Tokamak ASDEX Upgrade mit vier Gyrotrons ausgerüstet: Sie liefern bei 140 Gigahertz 2 Megawatt Leistung für zwei Sekunden bzw. 2,8 Megawatt für eine Sekunde. Die mit der ECRH mögliche lokalisierte Energieabgabe wird hier weniger zum Heizen als zur Verbesserung von Einschluss und Stabilität des Plasmas genutzt – mit beachtlichen Ergebnissen: der turbulente Charakter des Elektronenwärmetransports konnte nachgewiesen²¹, die verursachende Turbulenz mit ECRH verändert und ihr Einfluss auf das Dichteprofil erklärt werden²². Außerdem gelang es erstmalig, Neoklassische Tearing-Moden – Instabilitäten, die den Energieeinschluss erheblich reduzieren – zu unterdrücken²³, wobei die Effizienz der Methode durch modensynchrone Modulation der Mikrowellen gesteigert werden konnte²⁴. Durch zentrale Elektronenheizung wurde verhindert, dass sich schwere Verunreinigungen im Plasma ansammeln²⁵; schließlich konnte die Sägezahninstabilität gezielt beeinflusst und unterdrückt werden²⁶.

Gegenwärtig wird eine neue Anlage – mit 105 bis 140 Gigahertz und 4 Megawatt für 10 Sekunden – aufgebaut, deren Gyrotrons erstmals bei mehr als einer Frequenz arbeiten können²⁷. Mit ihrer Hilfe will man ein Verfahren entwickeln, die in ITER zu erwartenden magnetohydrodynamischen Instabilitäten zu stabilisieren. In dem seit 2007 vollständig mit Wolfram ausgekleideten ASDEX Upgrade will man sie nutzen, um die Wolfram-Ansammlung im Plasma zu kontrollieren²⁸ und um – mit Hilfe des von der ECRH getriebenen Stroms – Plasmaentladungen mit hohem intern getriebenem Strom zu entwickeln.



▲ Abb. 8



▲ Abb. 9

Abb. 7: Durch diesen Strahlenkanal werden die Mikrowellen einer Leistung von insgesamt 10 Megawatt über Metallspiegel bis in das Plasma von Wendelstein 7-X gelenkt.

Abb. 8: Absorber – mit Wasser durchflossene Teflonschläuche – für die Mikrowellen-Streustrahlung im Strahlenkanal.

9: Quasioptische Übertragungsleitungen für Mikrowellen an ASDEX Upgrade.