

Weltrekorde in der Gyrotronforschung

G. Dammertz, B. Piosczyk, M. Thumm, IHM

Einleitung

Für die Heizung von Fusionsplasmen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung: die Ohmsche Heizung, die Neutralteilcheninjektion und die Einstrahlung elektromagnetischer Wellen (HF-Wellen).

Die Absorption von HF-Wellen in einem Plasma ist besonders stark, wenn Wellen und Ladungsträger in Resonanz schwingen. Die Frequenz von (nichtrelativistischen) Elektronen in einem Magnetfeld (Zyklotronfrequenz) ist linear abhängig vom Magnetfeld und beträgt bei 2,5 T (Magnetfeld bisheriger Fusionsplasmen) 70 GHz. Dabei koppelt die elektromagnetische Welle an die Elektronen an, weswegen man diese Art der Heizung auch Elektron-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH) nennt. Zum Betrieb mit höheren Plasmadichten ist es häufig vorteilhaft, mit der 1. Oberwelle bei 140 GHz zu heizen.

Gyrotronentwicklung

Die Entwicklung von HF-Quellen (Gyrotrons) begann im Forschungszentrum in den Jahren 1983/1984. Das Entwicklungsziel war die Erzeugung einer Leistung von 200 kW bei 150 GHz; jedoch wurde die Frequenz bald an die existierenden Tokamakanlagen wie z. B. ASDEX und den Stellarator W7-AS in Garching auf 140 GHz angepasst.

In der Elektronenkanone eines Gyrotrons (Abb. 1) werden thermisch Elektronen emittiert und mittels einer Hochspannung zum Resonator beschleunigt. Dort wird ein großer Teil der kinetischen in elek-

tromagnetische Energie umgewandelt.

Als Schwingungsmode des ersten Gyrotrons wurde die TE_{03} -Mode gewählt (Abb. 2). Dieses Gyrotron besaß noch ein axiales Auskoppelfenster aus zwei Saphirscheiben, deren Abstand zur Reduktion von Reflexionen variiert werden konnte. Damit wurde in Kurzpulsexperimenten eine Leistung von 300 kW erreicht. Mit diesem Gyrotron wurden weltweit erstmalig

Heizexperimente und Stromtriebexperimente bei einer Frequenz von 140 GHz durchgeführt, und zwar am Stellarator W7-AS des Max-Planck-Instituts für Plasma-physik in Garching. Die ins Plasma eingestrahlte HF-Leistung betrug 120 kW für 0,4 s (im Dauerbetrieb) bzw. 1 s bei einem Tastverhältnis von 50 %.

Schon bald wurde der Wunsch nach höheren Leistungen laut. Um dabei die Ohmschen Wandverluste

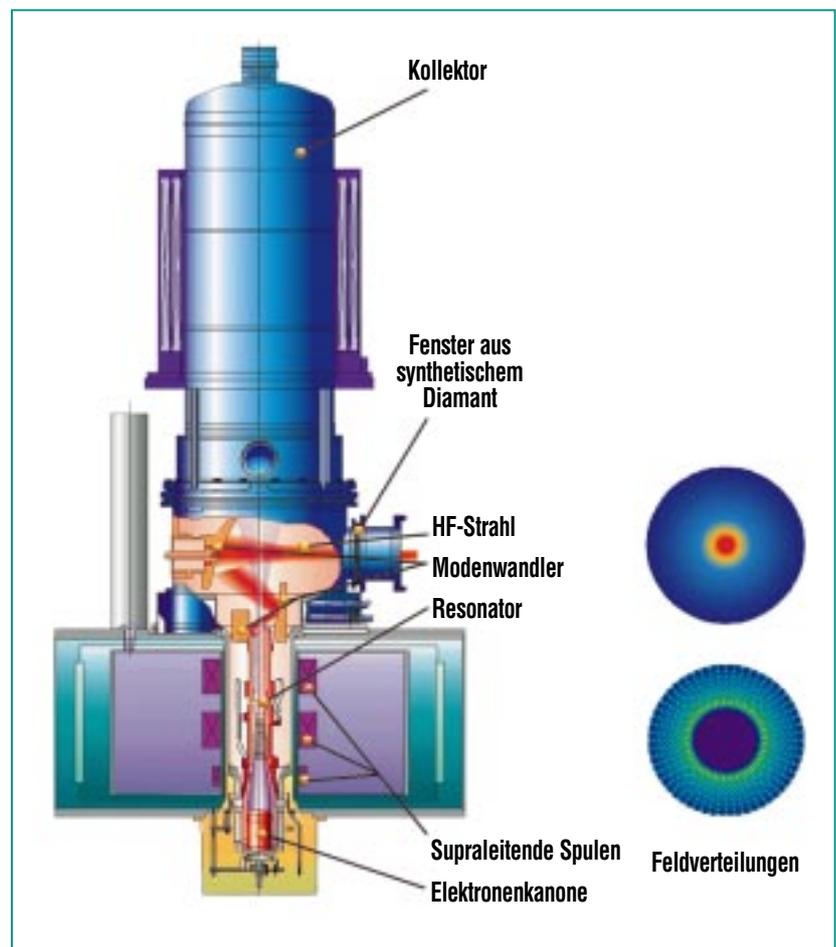


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Gyrotrons mit der Elektronenkanone, dem supraleitenden Magnetsystem, dem Resonator, dem Modenwandler, dem Diamantfenster und dem Kollektor. Auf der rechten Seite ist die Feldverteilung am Auskoppelfenster (oben) und im Resonator (unten) dargestellt. Die Umwandlung geschieht mittels des Modenwandlers.

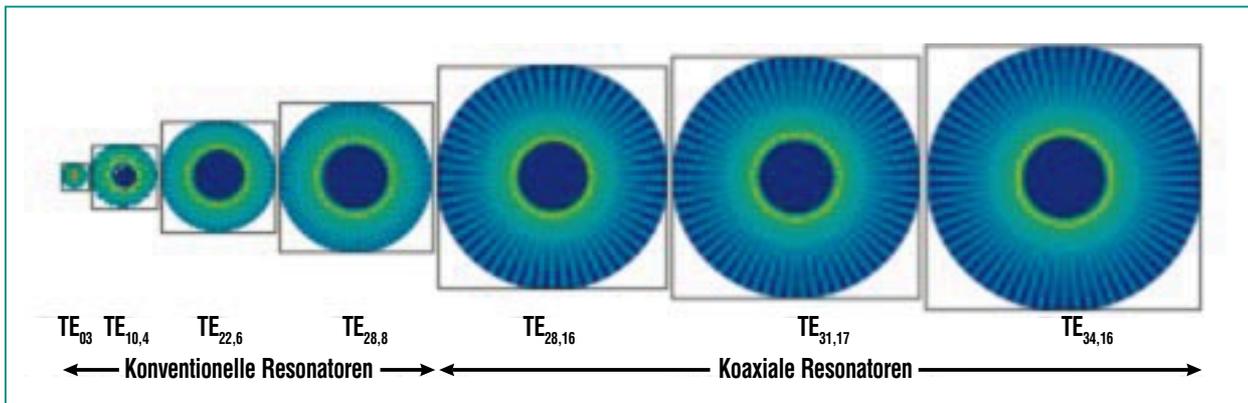


Abb. 2: Entwicklung der Resonatoren (maßstabsgetreu) und die Feldverteilung.

im Resonator in technisch akzeptablen Grenzen zu halten, müssen größere Resonatoren benutzt werden. Die nächste Generation, ein in der $TE_{10,4}$ -Mode betriebenes Gyrotron, erzeugte dann auch schon 700 kW bei einem Wirkungsgrad von 34 % bei Pulslängen bis zu 5 ms. Nachteilig war allerdings, dass der Kollektor gleichzeitig als Wellenleiter benutzt wurde, weswegen seine Geometrie nicht auf hohe Absorption optimiert werden konnte.

In einer Weiterentwicklung wurde das Gyrotron mit einem Modenwandler versehen, der die Resonatormode in einen Strahl mit Gaußscher Verteilung umwandelt und den HF-Strahl über ein Spiegelsystem auskoppelt, somit vom Elektronenstrahl räumlich abtrennt (Abb. 1). In dieser Anordnung lieferte die Röhre knapp 500 kW mit einem Wirkungsgrad von 34 % bei einer Pulslänge von 0,2 s. Dabei wurde auch erstmalig ein Kollektor mit Gegenpotenzial eingesetzt, der die Elektronen nach Durchlaufen des Resonators abbremst und so einen Teil der Energie zurück gewinnt. Diese Maßnahme führte zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads auf 51 %.

Noch höhere Leistungen wurden in der dritten Gyrotron-Generation mit dem $TE_{22,6}$ -Gyrotron möglich mit Ausgangsleistungen von 2,1 MW bei einem Wirkungsgrad von 53 %. Mit Hilfe dieses Gyrotrons wurde erstmalig die Möglichkeit zur stufenweisen Frequenzveränderung untersucht. Die Frequenz der HF-Welle muss mit einer Eigenfrequenz des Resonators übereinstimmen, was nur für diskrete Frequenzen möglich ist. Da weiterhin die Frequenz etwa der Zyklotronfrequenz entsprechen muss, muss das Feld der supraleitenden Magnete variiert werden, was bisher nur langsam möglich ist. In einem weltweit ersten Experiment wurde ein Quarzfenster eingesetzt, dessen Achse gegen die Strahlachse unter dem Brewsterwinkel geneigt war. Dadurch können für die linear polarisierten Wellen Reflexionen vollständig unterdrückt werden. Durch den Einbau des Brewsterfensters konnten im Frequenzbereich von 114 GHz bis 166 GHz Serien von HF-Wellen in einem Frequenzabstand von 3,7 GHz bei einer Leistung zwischen 800 und 1000 kW erzeugt werden. Durch den zusätzlichen Einbau eines normal-

leitenden Magneten konnte der Schaltzyklus in einem reduzierten Frequenzbereich auf 1s verkürzt werden.

Das Forschungszentrum erhielt 1998 den Auftrag, die ECRH für den neuen Stellarator W7-X in Greifswald aufzubauen. Eine wesentliche technische Forderung war dabei, die Pulslängen zu vergrößern. Die W7-X Gyrotrons werden in der $TE_{28,8}$ -Mode betrieben und sollen für 30 Minuten eine Leistung von 1 MW erbringen. Ein kritischer Punkt dabei sind die Fenster für eine HF-Dauerbelastung von mehr als 1 MW bei Raumtemperatur. Als geeignetes Material stellte sich künstlicher Diamant (chemical vapor deposited diamond: CVD-Diamant) heraus. Die neue Technologie für HF-Fenster wurde in einer Zusammenarbeit zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe (IHM und IMF I), dem „Japanese Atomic Energy Research Institute“, Japan, und DeBeers, UK, eingeführt.

Diese Entwicklung der W7-X-Röhren war derartig erfolgreich, dass bei der Firma Thales Electron Devices (TED) mit der Serienfertigung der Gyrotrons (Abb. 3) begonnen



Abb. 3: Foto des $TE_{28,8}$ -Gyrotrons für W7-X im Teststand des Forschungszentrums.

werden konnte. Das erste Serienmodell lieferte im Teststand des Forschungszentrums Karlsruhe eine Ausgangsleistung von 920 kW für drei Minuten (Begrenzung durch die Hochspannungsanlage), und 540 kW für 30 Minuten. Dieses Gyrotron wurde inzwischen an das IPP Greifswald geliefert und erzielte auch dort eine Ausgangsleistung von 920 kW, allerdings bei einer Pulslänge von 30 Minuten. Dieses Gyrotron hat damit den weltweit größten Energieinhalt pro Puls in diesem Frequenzbereich demonstriert.

Eine Ausgangsleistung von weit mehr als 1 MW erscheint zur Zeit mit herkömmlichen Resonatoren kaum möglich, da die Frequenzabstände mit zunehmender Größe kleiner werden und damit eine Trennung zwischen konkurrieren-

den Moden schwieriger wird. Einen Ausweg bietet der Übergang zu koaxialen Resonatoren. Durch Einführung eines Innenleiters in den Resonator kann der Modenabstand günstig beeinflusst werden.

Die grundsätzlichen Probleme von Gyrotrons mit koaxialem Resonator werden seit 1996 im Forschungszentrum Karlsruhe untersucht. Dabei wird der Innenleiter zur besseren Unterdrückung unerwünschter Moden konisch ausgeführt und mit Längsrillen versehen. Ein erstes Gyrotron mit koaxialem Resonator wurde bereits bei 140 GHz in der $TE_{28,16}$ -Mode betrieben. Die weiteren Entwicklungen wurden auf die Anforderungen von ITER (International Experimental Thermonuclear Reactor) mit einer Frequenz von 170 GHz abgestimmt.

Wegen der Begrenzung des Feldes bei dem vorhandenen supraleitenden Magneten wurden die Untersuchungen an einem koaxialen, in der $TE_{31,17}$ -Mode betriebenen Gyrotron zunächst bei 165 GHz durchgeführt. Das Gyrotron war für 1,5 MW ausgelegt, lieferte jedoch im Kurzpulsbetrieb eine Weltrekord-Ausgangsleistung von 2,2 MW. Die Entwicklung eines 170 GHz koaxialen $TE_{34,19}$ -Gyrotrons mit einer Mikrowellenleistung von 2 MW im Dauerbetrieb wurde in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Technischen Hochschule (EPFL) in Lausanne begonnen. Die Prototypversion wird zur Zeit bei TED gebaut, die Tests werden bei EPFL durchgeführt. Im Forschungszentrum Karlsruhe wird ein nahezu identisches Kurzpuls gyrotron getestet, mit dem die Auslegung einzelner Komponenten des Gyrotrons überprüft wird.

Zusammenfassung

Die jahrelange Erfahrung beim Bau und Test von Gyrotrons machte das Forschungszentrum zu einem weltweit führenden Institut in der Gyrotronentwicklung. Die Entwicklungsarbeiten begannen mit der Erforschung physikalischer Probleme bei kurzen Pulsen. Die Forschungsergebnisse werden nun konkret umgesetzt; die erste technische Anwendung ist die Heizung für den Stellarator W7-X. Die große Herausforderung heute besteht in der Entwicklung koaxialer Gyrotrons für ITER.