

Gyrotronröhren und Millimeterwellentechnik für die Kernfusion

G. Dammertz, K. Koppenburg, B. Piosczyk, M. Thumm, IHM: R. Heidinger, IMF

Einleitung

Für die Heizung von Fusionsplasmen auf viele Millionen Grad stehen mehrere Methoden zur Verfügung. Die einfachste, die Ohmsche Heizung, nimmt mit zunehmender Temperatur stark ab. Bei hohen Temperaturen wird daher das Plasma durch den Einschuss energiereicher Wasserstoffatome bzw. deren Isotope oder durch Einstrahlung elektromagnetischer Hochfrequenz-(HF)-Wellen geheizt.

Plasmaheizung mit HF-Wellen

Die Absorption elektromagnetischer Wellen in einem Plasma ist besonders stark, wenn sich Wellen und Ladungsträger nahezu synchron (resonant) bewegen. Die Kräfte auf die Ladungsträger sind ähnlich wie bei einem Wellenreiter: Ist dessen Geschwindigkeit im Vergleich zur Wasserwelle zu schnell oder zu langsam, so bewegt er sich über Wasserberge und durch Wassertäler; im Mittel gibt es keinen Energieaustausch. Ist die Geschwindigkeit identisch, so wird der Wellenreiter ohne Wechselwirkung zwischen zwei Wellenbergen pendeln. Es kommt zum Energieaustausch, wenn die Geschwindigkeiten der Welle und des Reiters nur geringfügig voneinander abweichen. Bei geringerer Geschwindigkeit des Wellenreiters überholt ihn die Wasserwelle, er fährt an der Vorderseite der Wasserwelle und entnimmt dieser Energie, bei höherer Geschwindigkeit fährt er an der Rückseite und verliert Energie.

Die Ladungsträger (Elektronen oder Ionen) besitzen im Plasma eine nahezu Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung. Die Anzahl der Ladungsträger mit geringerer Geschwindigkeit ist größer als die mit höherer Geschwindigkeit und im Mittel erfolgt eine Energieabgabe an die Ladungsträger. Die Ankopplung kann an die Ionen (Ionen-Zyklotron-Resonanz-Heizung: ICRH), an Elektronen und Ionen (Lower-Hybrid-Heizung: LHH) oder an die Elektronen (Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizung: ECRH) erfolgen.

Bei der ECRH ist wegen der kurzen Wellenlängen die Übertragung der Wellen mit überdimensionierten Hohlleitern oder optisch mit Spiegeln und eine gebündelte Abstrahlung ins Plasma unproblematisch. Zur Zeit werden Abstrahlsysteme mit korrigierten (mit Rillen versehenen) Hohlleitern untersucht, die eine Veränderung des Einstrahlwinkels ohne im Plasmagefäß angeordnete Spiegel ermöglichen.

Die Wechselwirkung der Millimeterwellen mit dem Plasma ist bei der ECRH gut lokalisiert, da Absorption nur dort stattfindet, wo die oben beschriebene Resonanzbedingung erfüllt ist. Daher kann das radiale Temperaturprofil des Plasmas geändert werden und durch nicht-induktives Treiben eines lokalen Stromes auch die Stabilität des Plasmas in Tokamaks kontrolliert werden. Es wurde weiterhin nachgewiesen, dass die ECRH auch zur effektiven Erzeugung eines heißen Plasmas aus dem neutralen Füllgas eingesetzt werden kann.

Das ECRH-Verfahren zur Heizung und zum nicht-induktiven Stromtrieb ist seit langem bekannt. Erst mit der Entwicklung leistungsstarker Millimeterwellen-Röhren (Gyrotrons) für den stationären Betrieb wurde diese Heizung und der nicht-induktive Stromtrieb für die Reaktoren der Zukunft wie z. B. für den „International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)“ und für den im Bau befindlichen Stellarator Wendelstein 7-X (W7-X) in Greifswald interessant.

Funktionsprinzip eines Gyrotrons

Das Prinzip dieser Mikrowellen-Oszillatordröhre beruht auf der Wechselwirkung zwischen einer Hohlleiterwelle in der Nähe ihrer Grenzfrequenz, bei der die Wellenlänge im Hohlleiter groß ist im Vergleich zu der im freien Raum, und einem hochenergetischen Elektronenstrahl. Das Prinzip der Energieabgabe zwischen Ladungsträgern und HF-Wellen wurde oben mit Hilfe des anschaulichen Effekts eines Wellenreiters erklärt. Zur Energieabgabe an die Welle ist es notwendig, dass die Geschwindigkeit des Wellenreiters etwas größer ist als die Geschwindigkeit der Welle. Bei einem Gyrotron (aus: Gyro = Kreisel und Elektron) wird die Wechselwirkung mit dem rotierenden HF-Feld auf Grund einer durch ein statisches Magnetfeld verursachten Transversalbewegung erzeugt. Da die Zyklotronfrequenz wegen der relativistischen Massenzunahme der Elektronen mit zunehmender Elektronengeschwindigkeit abnimmt (und die Teilchengeschwindigkeit

etwas größer als die Wellengeschwindigkeit sein muss), muss die Zyklotronfrequenz geringfügig kleiner sein als die Wellenfrequenz. Für nicht-relativistische Elektronen entspricht ein Magnetfeld von 1 Tesla einer Wellenfrequenz von 28 GHz.

Um eine Resonanzhöhung bei der Wechselwirkung zwischen Hohlleiterwelle und Elektronenstrahl zu erhalten, muss der Hohl-

leiter als Resonanzkörper ausgebildet werden. Dies erreicht man durch zwei Reflexionsstellen. Zum Erzeugungssystem des Elektronenstrahls hin verjüngt sich der Hohlleiter derart, dass dort keine HF-Wellen austreten können (Totalreflexion). Am Ausgang wird der Hohlleiter konisch aufgeweitet, sodass durch die Impedanzänderung eine teilweise Reflexion stattfindet. Ein Vorteil des Gyrotrons gegenüber ande-

ren Mikrowellenröhren besteht in der Möglichkeit, den Resonator bei sehr hohen Oberschwingungen anzuregen, da die angeregte Schwingung nicht nur durch dessen Eigenfrequenz, sondern auch durch die Resonanzbedingung zur Zyklotronfrequenz bestimmt ist.

Der Elektronenhohlstrahl wird von einem ringförmigen Emitter frei gesetzt und zur radial angeordneten Anode beschleunigt. Durch das zwischen Elektronenkanone und Resonator liegende und zum Resonator hin ansteigende statische Magnetfeld wird die Transversalgeschwindigkeit erhöht (magnetische Flasche) und der Elektronenhohlstrahl komprimiert, so dass er im Bereich der maximalen elektrischen Feldstärke der Resonatormode wechselwirkt. Das Anschwingen der Röhre (im „leeren“ Resonator) wird durch das in jedem Resonator vorhandene Rauschen initiiert.

Die HF-Welle wird durch einen überdimensionierten Hohlleiter zu einem quasi-optischen Wellentypwandler geleitet, der die Resonatormode in eine linear polarisierte, rotationssymmetrische Gauß'sche Mode umwandelt (Abb.1).

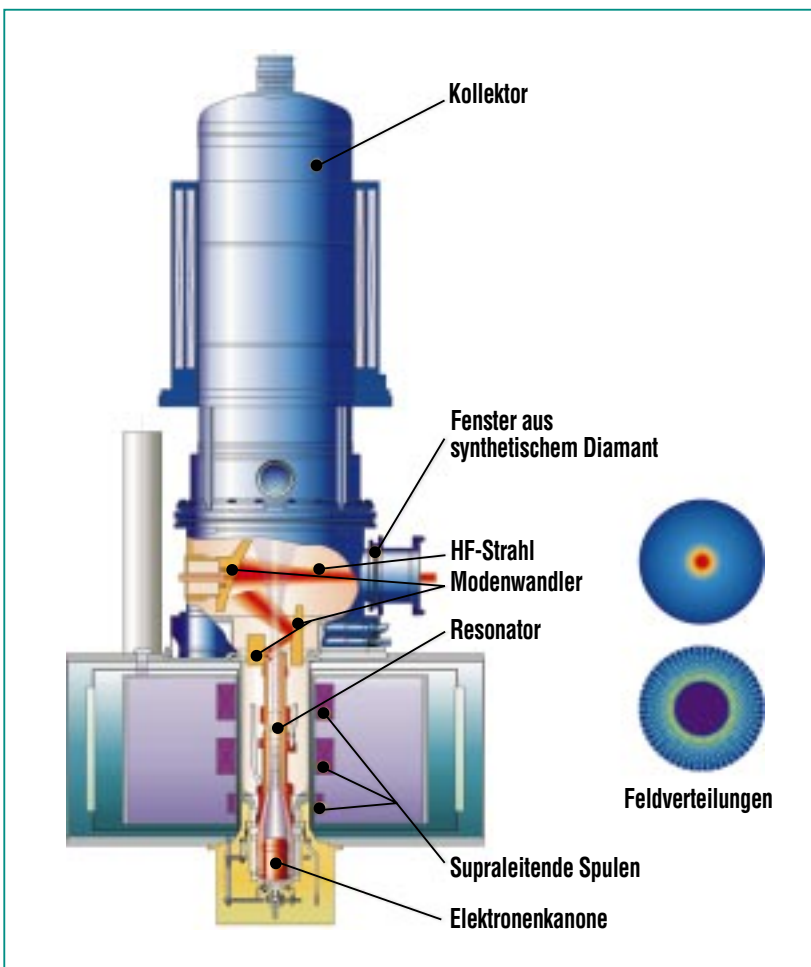


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Gyrotrons mit der Elektronenkanone, dem supraleitenden Magnetsystem, dem Resonator, dem Modenwandler, dem Diamantfenster und dem Kollektor. Auf der rechten Seite ist die Feldverteilung am Auskoppelfenster (oben) und im Resonator (unten) dargestellt. Die Umwandlung geschieht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

Entwicklungsaufgaben

Die Aufgaben im Forschungszentrum konzentrieren sich auf die Entwicklung und den Aufbau des 10 MW ECRH-Systems an W7-X, die Entwicklung von Gyrotrons mit koaxialem Resonator für ITER, von frequenzdurchstimmbaren Gyrotrons mit kon-

ventionellen Resonatoren für den Garching Tokamak ASDEX-Upgrade sowie die Entwicklung eines kompletten Antennenblocks zur Einkopplung der ECRH-Welle bei ITER.

ECRH-System für den Stellarator Wendelstein 7-X

Die Leistung von 10 MW an W7-X für nahezu stationären Betrieb soll von zehn Gyrotrons mit einer Ausgangsleistung von je 1 MW bei einer Frequenz von 140 GHz geliefert werden [1]. Die ECRH-Arbeiten werden innerhalb des „Projektes Mikrowellenheizung für W7-X (PMW)“ durchgeführt, dem das IHM, das Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching bzw. Greifswald und das Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart angehören. Bei der Entwicklung der Gyrotrons sind das Centre des

Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) in Lausanne, Schweiz, und die Röhrenfirma Thales Electron Devices (TED) in Frankreich beteiligt.

Der Einsatz von synthetischen Diamantscheiben (Abb. 2) zur Auskopplung des HF-Strahls aus dem Gyrotron stellte einen großen Schritt bei der Entwicklung von Gyrotrons dar, da andere Materialien durch ihre hohen Hochfrequenzverluste für Hochleistungs-gyrotrons ungeeignet sind. Ein weiteres Problem stellt die unvollständige Umwandlung der Resonatormode in die Ausgangsmode (Abb. 1) dar. Trotz Optimierung des Systems und einem experimentell ermittelten Wirkungsgrad von weltweit einzigartigen 97% verursacht die restliche vagabundierende HF-Strahlung, die teilweise im Gy-

rotron absorbiert wird, Temperaturerhöhungen, die auf Grund der damit verbundenen Druckerhöhungen (Ausgasen) zum Abschalten des Gyrotrons führten.

Abb. 3 zeigt die Ausgangsleistung der Prototypöhre als Funktion für verschiedenen Pulslängen. Für knapp 12s konnten 970 kW mit einem Wirkungsgrad von 44% erzeugt werden. Bei erniedrigter Leistung – 540 kW – führte eine Druckerhöhung nach 938 s zur Abschaltung des Gyrotrons.

Auf Grund der hervorragenden Ergebnisse in Ausgangsleistung und Pulslängen wurde die Entwicklung abgeschlossen und die Serienröhren mit den dazugehörigen supraleitenden Magnetsystemen bestellt. Die Röhren werden 2004 - 2007 geliefert, im Forschungszentrum getestet und im IPP Greifswald installiert. Die

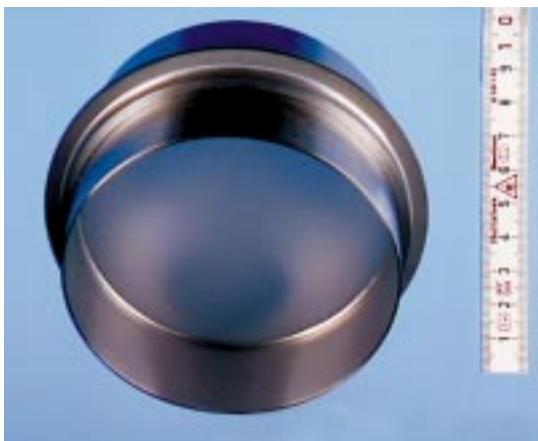


Abb. 2: Ein in Zusammenarbeit zwischen dem Forschungszentrum (IHM und IMF I), dem „Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)“, Japan, und DeBeers, Vereinigtes Königreich, entwickelte Scheibe aus synthetischem (CVD) Diamant. Die Scheibe hat einen Durchmesser von 106 mm und eine Dicke von 1,8 mm (300 Karat).

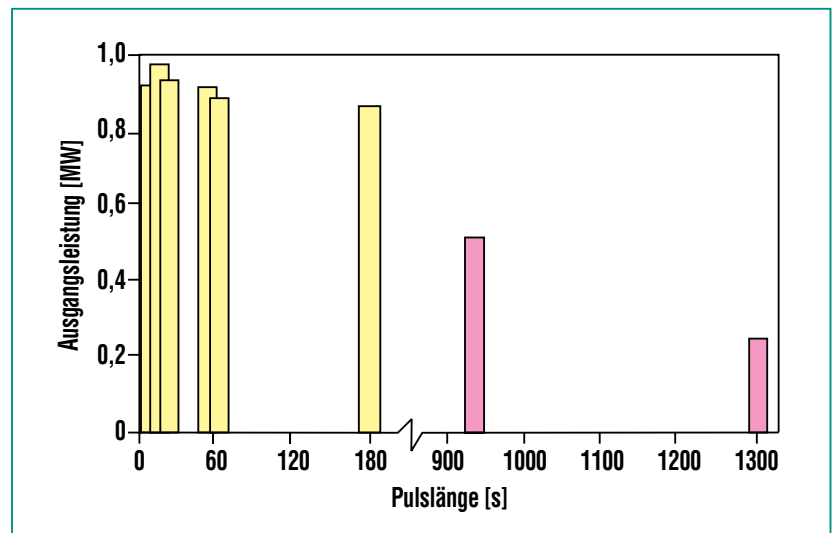


Abb. 3: Ausgangsleistung der Prototypöhre für W7-X bei verschiedenen Pulslängen. Bis zu 180 s ist die Pulslänge durch das Hochspannungsnetzgerät begrenzt. Bei niedrigen Leistungen (500 kW) sind längere Pulse möglich und die Begrenzung ist durch Ausgasen auf Grund vagabundierender HF-Strahlung innerhalb des Gyrotrons gegeben. Mit 505 MJ Energieinhalt stellt der 938 s lange Puls einen Weltrekord in diesem Frequenzbereich dar.

Übertragung der HF-Welle erfolgt quasi-optisch mit Hilfe von Anpass- und Fokussierspiegeln, die vom IPF der Universität Stuttgart entwickelt wurden.

Gyrotron mit koaxialem Resonator für Ausgangsleistungen von 2 MW

Für reduzierte ECRH-Kosten bei zukünftigen Fusionsreaktoren ist es günstig, möglichst hohe Ausgangsleistungen zu erzielen und damit die Anzahl der Gyrotrons und Magnete zu reduzieren. Gyrotrons mit zylindrischen Resonatoren stoßen wegen der Ohmschen Verluste im Resonator bei einer Ausgangsleistung von 1 MW an ihre technischen Grenzen. Für höhere Ausgangsleistungen müssen die Resonatoren vergrößert werden, womit die Anzahl der möglichen Schwingungsmoden steigt und die Anregung der gewünschten Schwingung schwieriger wird. Durch Einführung eines Innenleiters mit optimiertem Radius und Längsrille (Korrugation) können auch bei größeren Resonatoren stabile Schwingungsverhältnisse erzielt werden.

Ziele der Arbeiten sind Untersuchungen an Gyrotrons mit koaxialem Resonator in Hinblick auf die Verwirklichung für Langpulsbetrieb bei 170 GHz mit einer Ausgangsleistung von 2 MW für ITER. Dazu wurde im Forschungszentrum ein Gyrotron entwickelt und untersucht, das zwar im Kurzpulsbetrieb getestet wurde, jedoch mit für Langpulsbetrieb geeigneten Komponenten versehen war [2].

Die Ausgangsleistung betrug 2,2 MW (Weltrekord). Insbesondere wurden der Anteil der interneren Streustrahlung, der Einfluss der radialen Dejustierung des Innenleiters und die Verluste am Innenleiter bestimmt. Es wurden für Langpulsbetrieb keine begrenzenden Effekte gefunden.

Auf Grund dieser Messungen wurde ein Entwurf eines 170 GHz koaxialen Gyrotrons für eine kontinuierliche Ausgangsleistung von 2 MW erstellt. Dieser Entwurf erfolgte in Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen EURATOM-Assoziationen – dem Forschungszentrum, dem CRPP, der Helsinki University of Technology – sowie TED. Dabei wurden auch die bei ITER durch den Betrieb mit Deuterium und Tritium gegebenen Bedingungen berücksichtigt. Ein mit Wasser randgekühltes Einscheiben-Diamantfenster mit einem Durchmesser von 106 mm ist vorgesehen.

Frequenzdurchstimmbares Gyrotron für ASDEX-Upgrade

Magnetohydrodynamische (MHD) Instabilitäten schränken den Plasmadruck sehr stark ein und begrenzen damit die Effizienz von Reaktoren. Die Unterdrückung dieser Instabilitäten stellt eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung eines Fusionsreaktors dar.

Bei bisherigen Plasmaexperimenten beschränkte man sich zur Vermeidung von MHD-Instabilitäten auf den Ausschluss gefährlicher Plasmaparameterbereiche. Eine Rückkopplung auf die Verteilung der Plasmaströme

ist effektiver, da die Stabilität eines Tokamaks stark durch die Verteilung der Plasmaströme bestimmt ist. Dazu ist die ECRH hervorragend geeignet, da die Absorptionszone durch die Gyrotron-Frequenz und durch das Magnetfeld vorgegeben ist und gut lokalisierter Stromtrieb erreicht werden kann.

In früheren Experimenten wurde die Möglichkeit der stufenweisen Frequenzänderung zwischen 114 GHz und 166 GHz durch Veränderung des Magnetfeldes experimentell nachgewiesen [3].

In dem HGF-Strategiefondsprojekt „Optimisation of Tokamak Operation with Controlled ECRH-Deposition“ zwischen Forschungszentrum, IPP Garching und Forschungszentrum Jülich wird die Möglichkeit der Plasmastabilisierung untersucht. Die Entwicklung der frequenzdurchstimmbaren Gyrotrons wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik (IAP) der Russischen Akademie der Wissenschaften in Nizhny Novgorod durchgeführt. Im Forschungszentrum werden die durch die Breitbandigkeit hervorgerufenen Probleme untersucht: Die Minimierung der Streustrahlung und die reflexionsfreie Auskopplung der HF-Welle.

Entwicklung eines ECRH-Einspeisesystems für ITER zur Unterdrückung von Plasmainstabilitäten

Der Ausbildung der MHD-Instabilitäten soll bei ITER durch Einspeisung von Millimeterwellen mit einer Leistung von etwa 20 MW in kontinuierlichem Be-

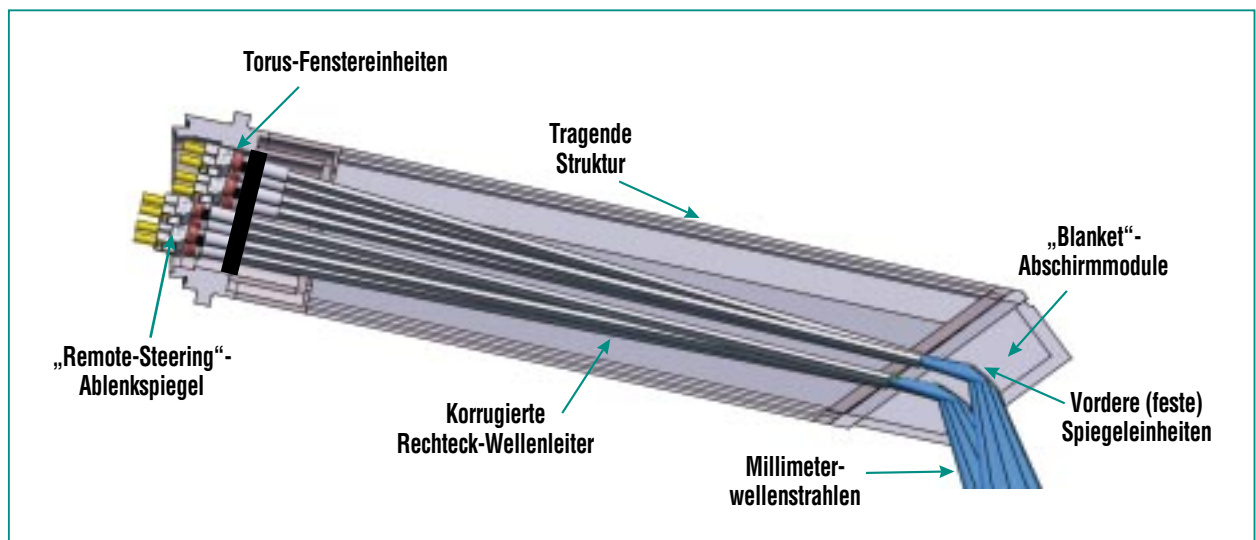


Abb. 4: „Remote-Steering“-Aufbau eines ECRH-Einspeisesystem für ITER: Millimeterwellen-Leistung wird von beweglichen plasmafernen Ablenkspiegeln über winkelerhaltende Hohlleiter auf starre plasmanaher Spiegel geführt.

trieb entgegen gewirkt werden, wobei die Absorptionszonen im Plasma bei fester Frequenz (170 GHz) über den poloidalen Einstrahlwinkel verändert werden. Auf Grund der aktuell erreichten Ausgangsleistungen in der Gyrotronentwicklung sind Strahlführungseinheiten für 1 MW projektiert (mit der Option auf 2 MW). So werden derzeit 24 Einheiten vorgesehen, die auf drei identische Antennenblocks („Plugs“) in der oberen Port-Ebene des Plasmatorus verteilt sind [4].

Die wesentlichen Komponenten eines Port-Plugs sind in Abb. 4 dargestellt. Der thermischen und neutronischen Belastung wird durch Abschirmkomponenten (Blanket Shield Module: BSM) begegnet, die die Blanketstruktur des Torus schließen. Die ersten Tritiumbarrieren werden durch Hochleistungsfenstereinheiten aus synthetischem Diamant gebildet. Außerhalb dieses primären Vakuumbereichs befinden sich

die Spiegeleinheiten, über die die Winkelabstimmung erfolgt. In Plasmanähe verbleiben nur starre Spiegel. Dieses „Remote Steering Concept“ verzichtet damit auf eine hochpräzise Abstimmung der Spiegelneigungen und flexiblen Kühlwasserführung im hochbelasteten BSM.

Zusammen mit europäischen Partnern (z.B. „Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM)-Institut für Plasmaphysik in Rijnhuizen (Niederlande) für das Millimeterwellen-Design) wurde der Aufbau auf einfache Zerlegbarkeit optimiert, damit aktivierte und mit Beryllium kontaminierte Komponenten ausgetauscht werden können. So wurde vorerst auf eine aufwändige gewinkelte Strahlführung verzichtet. Modellrechnungen, die den Strömungseffekt der Neutronen entlang der Mikrowellen-Hohlleiterstrukturen quantifizieren, sind ein wichtiger Bestandteil der Designentwicklung. Schlüsselkomponenten bil-

den die Torusfenstereinheiten, die in Form von Einscheiben- bzw. Doppelscheiben-Anordnungen mittels thermo-mechanischer Modellrechnungen ausgelegt werden. Ein Hochleistungstest einer Einspeiseeinheit wird für 2005 am Gyrotronteststand des Forschungszentrums vorbereitet und bildet einen wesentlichen Meilenstein in der nächsten Programmphase.

Für die endgültige Festlegung des Designs wird die Größe des erreichten Stromtriebes im Plasma unter der Federführung des IPP Garching modelliert. Durch geeignete Fokussierung kann die Gütezahl für den Stromtrieb verdoppelt werden, dies wird durch Einschränkungen im Winkelbereich erkauft. Die daraus sich ergebenden Konsequenzen für den Aufbau der „Port Plugs“ bilden den Gegenstand der nächsten Entwicklungsarbeiten.

Literatur

- [1] G. Dammertz, S. Alberti, A. Arnold, E. Borie, V. Erckmann, G. Gantenbein, E. Giguet, R. Heidinger, J.P. Hogge, S. Illy, W. Kasperek, K. Koppenburg, M. Kuntze, H.P. Laqua, G. LeCloarec, Y. LeGoff, W. Leonhardt, C. Liévin, R. Magne, G. Michel, G. Müller, G. Neffe, B. Piosczyk, M. Schmid, K. Schwörer, M. Thumm, M.Q. Tran, *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 30 (2002) 808-818
- [2] B. Piosczyk, A. Arnold, G. Dammertz, O. Dumbrajs, M. Kuntze, M. Thumm, *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 30 (2002) 819-828
- [3] M. Thumm, A. Arnold, E. Borie, O. Braz, G. Dammertz, O. Dumbrajs, K. Koppenburg, M. Kuntze, G. Michel, B. Piosczyk, *Fusion Engineering and Design* 53 (2001) 407-421
- [4] R. Heidinger, I. Danilov, G. Dammertz, U. Fischer, G. Hailfinger, K. Kleefeldt, A. Meier, E. Stratmanns, M. Thumm, A.G.A. Verhoeven, *Proc. Joint US-JA and EU-JA Workshop on RF Heating Technology, Tokai (Japan), 25-26 September 2003*