Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 75 (1984)

Heft: 21

Artikel: Messprobleme bei 120 GHz

Autor: Rieder, C. / Perrenoud, A. / Schleipen, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904498

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Messprobleme bei 120 GHz

C. Rieder, A. Perrenoud, M. Schleipen, T. M. Tran, M.Q. Tran

Zur Heizung des Plasmas in zukünftigen Kernfusionsreaktoren werden Mikrowellenröhren benötigt, welche im Frequenzbereich 100...150 GHz hohe Leistungen in der Grössenordnung von 1 MW erzeugen. Eine Projektgruppe des CRPP befasst sich mit der Entwicklung einer solchen Röhre, eines Gyrotrons. Die dabei zu erwartenden Hohlleiter-Messprobleme bei 120 GHz werden in diesem Artikel aufgezeigt sowie mögliche Lösungsvorschläge angegeben.

Pour chauffer le plasma dans un réacteur à fusion nucléaire, il faudra des tubes électroniques qui produisent des ondes millimétriques dans le domaine de fréquence entre 100 et 150 GHz avec une puissance de l'ordre de 1 MW. Un groupe du CRPP a entrepris le développement d'un prototype d'un tel tube, appelé gyrotron. Cet article montre les problèmes de mesure à 120 GHz qui se posent lors de ce développement et fait des propositions pour les résoudre.

Vortrag an der Tagung vom 15. Mai 1984 des IEEE Swiss Section Chapter on Electromagnetics and Microwaves (AP-MTT).

Adresse der Autoren

C. Rieder, A. Perrenoud, M. Schleipen, T.M. Tran und *M.Q. Tran*, Centre de Recherches en Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 1007 Lausanne.

1. Einleitung

Im zur ETH Lausanne gehörenden CRPP (Centre de Recherches en Physique des Plasmas) wird seit 20 Jahren praktische und theroretische Forschung auf dem Gebiet der Plasmaphysik betrieben. Ein wichtiges Ziel dieser Forschung ist die Produktion von Energie durch Fusion von leichten Atomen wie Wasserstoff. Zur Aufheizung des Plasmas in Versuchsreaktoren werden u.a. elektromagnetische Wellen eingesetzt. In Frage kommen dabei verschiedene Frequenzbereiche, wobei heute vor allem die folgenden drei Systeme erprobt werden:

- die Alfvén-Wellen-Heizung bei 1...3 MHz
- die Ionen-Zyklotron-Heizung bei 30...60 MHz
- die Lower-Hybrid-Heizung bei 1...8 GHz

Alle diese Heizungsarten haben ihre Nachteile, die man mit einer vierten, der Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizung (ECRH), zu vermeiden sucht. Die wenigen existierenden Anlagen dieses Typs versprechen gute Chancen. Die ECR-Heizung arbeitet bei einer wesentlich höheren Frequenz, die von der Stärke des magnetischen Feldes, in dem sich das Plasma befindet, abhängt. Für heutige Installationen liegt sie bei etwa 60 GHz. Für grössere Experimente der nächsten Generation benötigt man höhere Frequenzen in der Grössenordnung von 150 GHz. Das Gyrotron wird als die am meisten erfolgversprechende Röhre zur Erzeugung hoher Leistungen auf dieser Frequenz angesehen.

Eine Projektgruppe des CRPP befasst sich deshalb mit der Entwicklung eines Gyrotrons, mit dem man eine Leistung von 200 kW bei einer Frequenz von 120 GHz erreichen will.

2. Prinzip des Gyrotrons

Das Gyrotron des CRPP (Fig. 1) wird für eine Frequenz von 120 GHz und eine Leistung von 200 kW dimensioniert. In einer Elektronenkanone wird ein Elektronenstrahl mit 70 keV Energie erzeugt. Zwei supraleitende Spulen erzeugen ein Magnetfeld von

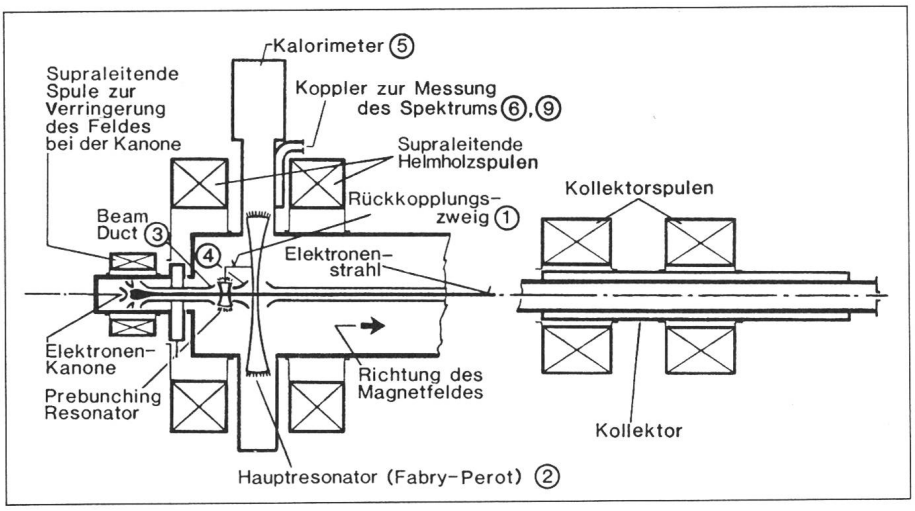

Fig. 1 Schema eines quasioptischen Gyroklystrons
①...⑥, ⑨ Messprobleme beschrieben in den Tabellen I und II

Reflexions- und Transmissionsmessungen Tabelle I

Messproblem	Messung I	Hohlleitergrösse
(1) Rückkopplungsschaltung im Gyrotron mit Abschwächer und Phasenschieber	komplexe R und T	WR6 (= R1400)
(2) Fabry-Perot-Resonator: Kopplung und Q	skalare R und T	WR6
(3) Dielektrizitätskonstante von Absorptionsmaterialien	komplexe R und T	WR6
(4) Beam Duct im Gyrotron mit Absorptionsmaterial zur Dämpfung der Wanderwellen	skalare R und T	WR6
(5) Kalorimeter zur Messung der Ausgangsleistung des Gyrotrons	skalare R	2½ Inch
(6) Koppler am Ausgang des Gyrotrons zur Messung des Spektrums	skalare R und T	2½ Inch

R = Reflexion T = Transmission

etwa 5 Tesla in der Richtung des Elektronenstrahls. Die Elektronenkanone ist so gebaut, dass die Elektronen zusätzlich zur Geschwindigkeit in Längsrichtung eine transversale Geschwindigkeit erhalten. Das starke Magnetfeld bewirkt, dass sich die Elektronen auf einer spiralförmigen Bahn von der Kanone durch die beiden Resonatoren zum Kollektor bewegen, wo sie aufgefangen werden und die Energie in Form von Wärme abgegeben wird. Der Elektronenstrahl ist mit 70 keV schon ziemlich relativistisch, die transversale Geschwindigkeit der Elektronen beträgt 26%, die Längsgeschwindigkeit 17% der Lichtgeschwindigkeit. Ein relativistischer Effekt bewirkt, dass die Elektronen beim Durchlaufen eines Resonators durch die Spiralbewegung Energie abgeben und den Resonator anregen. Im quasi-optischen Gyrotron besteht dieser aus zwei sphärischen Spiegeln (Fabry-Perot-Resonator). Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, wurde dem grossen Resonator ein kleiner Resonator vorgeschaltet, welcher mit diesem durch einen Rückkopplungszweig verbunden ist. Die Leistung wird vom Hauptresonator ausgekoppelt und im Kalorimeter gemessen.

3. Reflexions- und Transmissionsmessprobleme

In Tabelle I sind die Reflexions- und Transmissionsmessprobleme, die sich bei der Entwicklung des Gyrotrons ergeben, aufgelistet.

3.1 Mögliche Lösungen

Für Frequenzen über 110 GHz scheint es keine käuflichen Netzwerkanalysatoren zu geben. Somit hat man die Wahl, entweder mit einfachen Hohlleiterschaltungen die komplexe Reflexion und Transmission zu messen oder selbst einen Netzwerkanalysator (NWA) zu konstruieren. Die einfachen Hohlleiterschaltungen haben den Vorteil, dass man mit wenig Aufwand an Mitteln und Zeit ein Messsystem aufbauen kann. Dafür benötigt man aber für die Messung selbst sehr viel Zeit, wenn diese bei vielen Frequenzen durchgeführt werden muss. In der Praxis wird man sich deshalb mit der Messung bei wenigen Frequenzen begnügen.

Beim NWA hat man die Wahl zwischen einem manuellen oder automatischen. Der manuelle NWA führt die Messungen mit einem gewobbelten Oszillator durch und zeigt die Phase und den Betrag von Reflexion und Transmission auf einem K.O.-Schirm an. Damit benötigen Messungen über breite Frequenzbänder viel weniger Zeit als bei den einfachen Messschaltungen. Zusätzlich ergibt sich eine übersichtliche Darstellung der Messresultate. Der automatische NWA schliesslich wird von einem Rechner gesteuert und misst punktweise in einem bestimmten Frequenzraster. Gegenüber dem manuellen NWA hat die Rechnersteuerung den Vorteil, dass sich gewisse Fehler des Messsystems korrigieren lassen. Sie hat aber den Nachteil, dass in einem Frequenzraster gemessen wird und somit immer Frequenzlücken vorhanden sind.

3.2 Beispiele für einfache Messschaltungen

Die Reflexions- und Transmissionsmessung funktionieren nach demselben Prinzip. Der linke Koppler (Fig. 2 und 3) koppelt einen Teil der einfallenden Welle aus. Dieser wird in einen variablen Phasenschieber und in einen variablen Abschwächer in Phase und Amplitude um einen konstanten Betrag verändert und gelangt zum Leistungskombinierer. Der zweite Koppler in der Reflexionsmessschaltung (Fig. 2) koppelt einen Anteil der reflektierten Welle aus, welcher zum zweiten Eingang des Leistungskombinierers gegeben wird. Die beiden Anteile werden im Leistungskombinierer superponiert und die Summe dem Detektor zugeführt. Man kann nun anstelle des Testobjekts einen Kurzschluss anschliessen und eine Eichung durchführen, indem man den Phasenschieber und den Abschwächer auf ein Minimum am Detektor abgleicht. Dann schliesst man das Testobjekt an und gleicht wieder auf Null ab. Die Differenz der Einstellung am Phasenschieber und am Abschwächer ist die gesuchte Reflexion. Bei der Schaltung der Figur 3 wird statt der reflektierten Welle die durch das Zweitor transmittierte Welle ausgekoppelt.

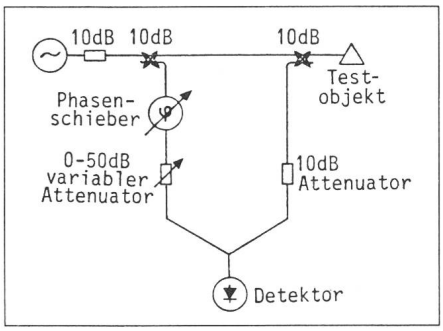

Fig. 2 Komplexe Reflexionsmessung

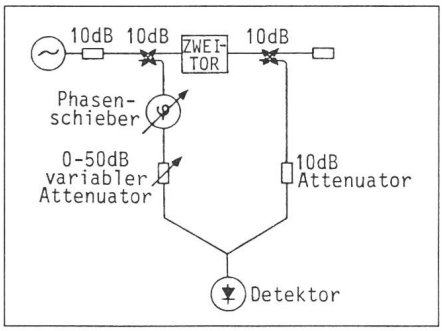

Fig. 3 Komplexe Transmissionsmessung

3.3 Methoden für automatische NWA-Schaltungen

- *Mischervariante:* Die zu messenden Signale werden auf eine tiefere Frequenz umgesetzt und dort gemessen.
- *4-Tor-Variante:* Ein Hohlleiterhybrid wird verwendet zum Vergleich eines Mess- und eines Referenzpfades. Die Leistung am E-Arm wird für drei verschiedene Referenzreflexionen gemessen. Die gesuchte Reflexion lässt sich aus den drei gemessenen Leistungen berechnen.
- *6-Tor-Variante:* Die Leistungen der Vorwärtswelle, der Rückwärtswelle und diejenige von zwei Spannungssonden, welche sich an verschiedenen Positionen im Hohlleiter befinden, werden gemessen. Aus diesen Werten lässt sich die Reflexion berechnen.

3.4 Wahl der Variante

Bei einer Grosszahl der Messungen (Tab. I) genügt die Kenntnis des Betrages der Reflexion bzw. der Transmission. Deshalb soll ein einfaches gewobbeltes System für skalare Messungen gebaut werden. Vektorielle Messungen werden vorerst mit einer einfachen Messschaltung durchgeführt. Damit will man mit wenig Aufwand ein Gefühl für Phasenmessungen bekommen, da diese bei 120 GHz, d.h. bei einer Hohlleiterwellenlänge von 3,8 mm, äusserst kritisch sein könnten. In einem nächsten Stadium werden Versuche gemacht zur Realisierung der 4-Tor- oder 6-Tor-Variante.

Spektrumsmessungen Tabelle II

Messproblem	Messung von	Hohlleitergrösse
(7) Backwave-Oszillator (Carcinotron) = Quelle für Messungen auf 120 GHz	120 GHz, Trägerbreite, Grundrauschen	WR6
(8) Fabry-Perot-Resonator: Q-Messung (Q = 125 000)	120 GHz, Halbwertbreite der Reflexion oder Transmission	WR6
(9) Gyrotron	Spektrum	2½ Inch

4. Spektrummessprobleme

Die Spektrummessaufgaben sind in der Tabelle II zusammengestellt. Zur Messung des Spektrums bei 120 GHz gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die einfachste wäre der Kauf eines externen Mischers zum vorhandenen Spektrumanalysator. Solche Mischer verwenden direkt den Oszillator des Spektrumanalysators, dessen *n*-te Harmonische mit den 120 GHz das Mischprodukt bildet. *n* ist aber für 120 GHz sehr hoch, da die Lokaloszillatoren üblicher Spektrumanalysatoren auf 2...4 GHz schwingen. Dies hat einen sehr hohen Mischverlust zur Folge. Etwas besser verhält sich ein unabhängiger harmonischer Mischer, der mit einem externen Lokaloszillator auf 15 GHz betrieben wird. Eine solche Schaltung hat einen Mischverlust von etwa 40 dB.

Vorerst hat man sich für diese Lösung entschieden, auch wenn die Zwischenfrequenz relativ schmalbandig ist. Sollte sie nicht zufriedenstellend sein, könnte man eine teurere Variante mit einem Oszillator auf 60 GHz und dem Harmonischenfaktor 2 wählen.

5. Realisierung

Bedingt durch einen Lieferverzug der Messkomponenten konnten erst wenige Messungen durchgeführt werden. Dabei wurden WR6-Hohlleiter-Komponenten (110...170 GHz) und ein elektrisch wobbelbares Carcinotron (120...150 GHz) von Thomson-CSF eingesetzt. Das letztere läuft zufriedenstellend, gibt genügend Leistung ab (0,6...0,8 W, je nach Frequenz) und ist ziemlich frequenzstabil. Mit den weiteren Experimenten sollen Erfahrungen in der WR6-Hohlleitertechnik gewonnen werden, damit die zu entwickelnden Hohlleiterkomponenten für das Gyrotron gemessen werden können.