

Leistungseinkopplung in ein Plasma erhöhter Elektronentemperatur bei der unteren Hybridresonanz

G. Glomski, B. Heinrich und H. Schlüter

Institut für Experimentalphysik II, Ruhr-Universität Bochum

Z. Naturforsch. **33a**, 1447–1451 (1978); eingegangen am 2. Oktober 1978

Power Transfer to a Plasma of Elevated Electron Temperature Near the Lower Hybrid Resonance

Previous investigations of lower hybrid resonant coupling to plasmas of low collision frequencies and elevated electron temperature are extended to cover a range of some mW to 1500 W of reactive power. Though resonant behaviour is observed throughout, the efficiency of power transfer is lowered when a threshold at about 1 Watt of reactive power is surpassed. Moreover there is a limited decrease of electron density. For high powers saturation in the drop of transfer efficiency is observed.

1. Einleitung

In der hier vorgestellten Untersuchung wird das Verhalten von Plasmen erhöhter Elektronentemperatur ($\cong 10^6$ K) im Resonanzgebiet in der Umgebung der unteren Hybridfrequenz beschrieben; und zwar soll in dieser Arbeit gezeigt werden, wie sich das Absorptionsvermögen ändert, wenn die dem Plasma angebotene Wellenenergie innerhalb weiter Grenzen variiert wird.

In einer früheren Arbeit [1] war darüber berichtet worden, daß bei der Einkopplung von Radiofrequenzwellen die vom Plasma aufgenommene Wirkleistung von der in der Senderspule angebotenen Blindleistung abhängt. Besonderer Wert wurde dabei auf die Erreichung niedriger Stoßfrequenzen und erhöhter Elektronentemperatur gelegt. Damals konnte gezeigt werden, daß bei kleiner Blindleistung bis etwa 25 mW konstante eingekoppelte Wirkleistung erhalten wird. Ein weiterer Teil der Messungen ergab, daß ab einer Wellenleistung von etwa 2,5 W ein deutlicher Abfall der prozentual eingekoppelten Wirkleistung beobachtet wird. Gleichzeitig konnte eine merkliche Verminderung der Elektronendichte gemessen werden. Der Schwellwert der Blindleistung (und damit der aufgenommenen Wirkleistung), bei dem diese Änderungen des Plasmaverhaltens auftraten, konnte damals jedoch nicht beobachtet werden, da in diesem Bereich keine geeigneten Hochfrequenzsender zur Verfügung standen.

Diese Schwierigkeit konnte inzwischen überwunden werden, so daß die Lücke in den damaligen Messungen geschlossen werden kann. Eine Änderung der Magnetfeldkonfiguration ermöglichte es darüber hinaus, Messungen durchzuführen, bei

denen die angebotene Blindleistung weit über der damaligen Grenze (etwa 200 W) lag, ohne daß wie zuvor [1] der Druck erhöht und damit die Elektronentemperatur abgesenkt werden mußte. Somit kann jetzt über Messungen berichtet werden, die beschreiben, wie die von einem Plasma erhöhte Elektronentemperatur aufgenommene Wirkleistung von der angebotenen Blindleistung im Bereich von etwa 2 mW bis 1500 W abhängt. Von Interesse ist dabei auch gerade der Bereich hoher Leistung, bei dem früher [1] die Entladung nicht mehr aufrechterhalten werden konnte.

2. Experimenteller Aufbau

Die Apparatur, an der die Untersuchungen durchgeführt wurden, ist bereits an anderer Stelle [2] ausführlich behandelt worden. Deshalb soll hier nur kurz das Wesentliche wiederholt werden.

In einer magnetischen Spiegelanordnung wurde eine Mikrowellenentladung ($\nu = 2,45$ GHz) untersucht. Das Arbeitsgas war Wasserstoff. Durch geeignete Pumpenanordnung, Durchströmen des H_2 und Querschnittsveränderung des Entladungsgefäßes wird dafür gesorgt, daß die Zündung bei relativ hohen Drücken ($\cong 10^{-3}$ Torr) erfolgt, um ein ausreichend dichtes Plasma zu erhalten (etwa $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$). In einem Bereich niedrigen Druckes ($\cong 8 \cdot 10^{-5}$ Torr) findet Zyklotronresonanzheizung der Elektronen statt, um möglichst niedrige Stoßfrequenzen ($\nu_{\text{eff}} \cong 7 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$) und hohe Elektronentemperaturen ($T_e \cong 10^6$ K) zu erreichen. Die Frequenz der bei den Untersuchungen über eine Einwindungsspule ins Plasma eingekoppelten Radiowellen lag bei 16,5 MHz. Das Hauptmagnetfeld wird (anders als zuvor [2]) durch 4 große Spulen



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

erzeugt. Dadurch wird eine Verlängerung des homogenen Magnetfeldbereiches in der Mitte der Entladung und damit eine Verringerung der Wandverluste erzielt. Zusätzlich zu der früher [2] gezeigten Senderankopplung wurden weitere Verstärkerstufen benutzt, bei den höchsten Leistungen auch eine schon zuvor [1] verwendete Anordnung.

3. Ergebnisse

Um das Resonanzverhalten des Plasmas zu beurteilen, wurde — wie in den früheren Arbeiten beschrieben — mit Hilfe von Strom- und Spannungs sonden an der Koppelspule über einen Netzwerkanalysator der Lastwiderstand des Plasmas bestimmt. Ein typisches Meßergebnis zeigt die Abb. 1, in der der Reziprokwert des (reellen) Plasmawiderstandes $1/R_p$ in Abhängigkeit von ω_0/ω aufgetragen ist. Die angebotene Blindleistung betrug etwa 500 mW.

In der Abbildung bezeichnet ω_0 die untere Hybridfrequenz, die bei den hier vorliegenden Plasmamparametern sehr gut mit dem geometrischen Mittel $(\omega_e \cdot \omega_i)^{1/2}$ aus den beiden Zyklotronfrequenzen der Elektronen bzw. Ionen übereinstimmt; $\omega/2\pi$ ist die Frequenz der eingekoppelten Wellen. $1/R_p$ spiegelt direkt das Verhalten der eingekoppelten Leistung P_E wider. P_E kann bei bekannter Senderspannung U aus $P_E = U^2/R_p$ bestimmt werden. Die Variation von ω_0/ω wurde durch Änderung des in ω_0 enthaltenen Magnetfeldes erreicht, da dieses apparativ leichter durchzuführen ist als eine entsprechende Änderung der Frequenz. Beide Möglichkeiten bringen im hier betrachteten

Bereich ohnehin nahezu identische Ergebnisse, wie frühere Untersuchungen zeigen [3].

In der Abbildung wird deutliches Resonanzverhalten des Plasmas in der Umgebung der unteren Hybridfrequenz ($\omega_0/2\pi = 16,5$ MHz) sichtbar. Das Resonanzgebiet erstreckt sich über den Frequenzbereich von ungefähr 9 bis 40 MHz (entsprechend $\omega_0/\omega = 0,4 \dots 1,8$).

Eine weitere Betrachtung der Einzelergebnisse soll hier jedoch nicht durchgeführt werden, da diese sehr gut mit schon früher berichteten [1,2] übereinstimmen; auch Vergleiche mit vorliegenden linearen Theorien sind bereits vorgenommen worden. Gegenstand dieser Untersuchung ist vielmehr die Änderung von P_E in Abhängigkeit von der angebotenen Senderleistung. Einen Gesamtüberblick über das Verhalten von P_E zeigt — in halblogarithmischer Darstellung — die Abb. 2, und zwar ist auf der Ordinate die prozentual eingekoppelte Leistung $P_E/P_A \cdot 100$ im Absorptionsmaximum aufgetragen, die also so etwas wie den Wirkungsgrad bei der Hochfrequenzeinkopplung darstellt. Man sieht, daß bei kleineren Blindleistungen dieser Wirkungsgrad unabhängig von der angebotenen Senderleistung ist. Bei 1 W Blindleistung jedoch sinkt die eingekoppelte Leistung von etwa 6% kontinuierlich auf ungefähr 1% bei 1500 W Blindleistung ab. Die Abb. 3a und 3b zeigen das gleiche noch einmal in linearer Darstellung, und zwar für kleinen (0 ... 3 W) und großen Blindleistungsbereich (0 ... 1500 W).

Wie sich schon früher andeutete [1], wurde auch diesmal eine deutliche Abhängigkeit der Elektronen-

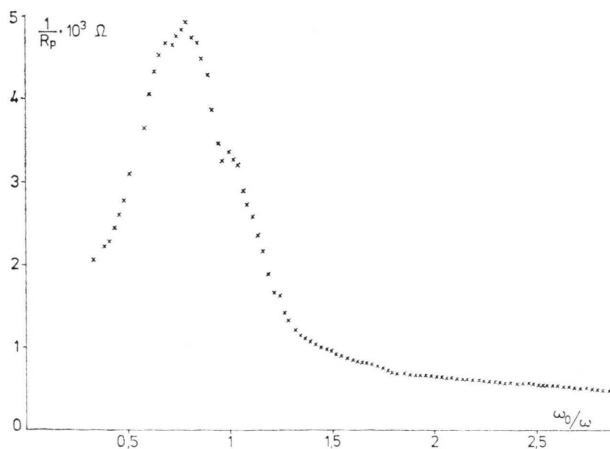


Abb. 1. $1/R_p$ als Funktion von ω_0/ω .

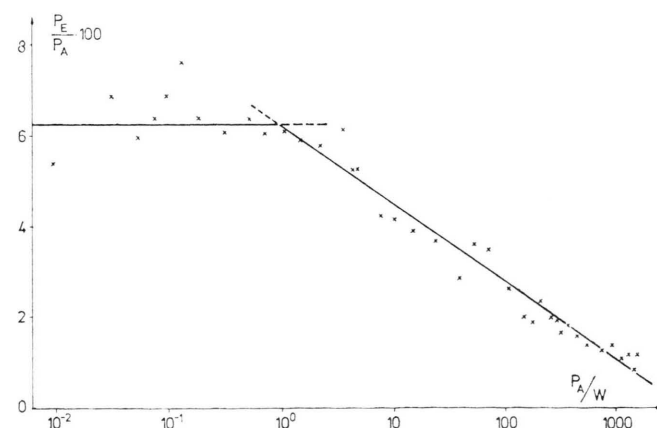


Abb. 2. Wirkungsgrad der Hochfrequenzeinkopplung in Abhängigkeit von der Blindleistung.

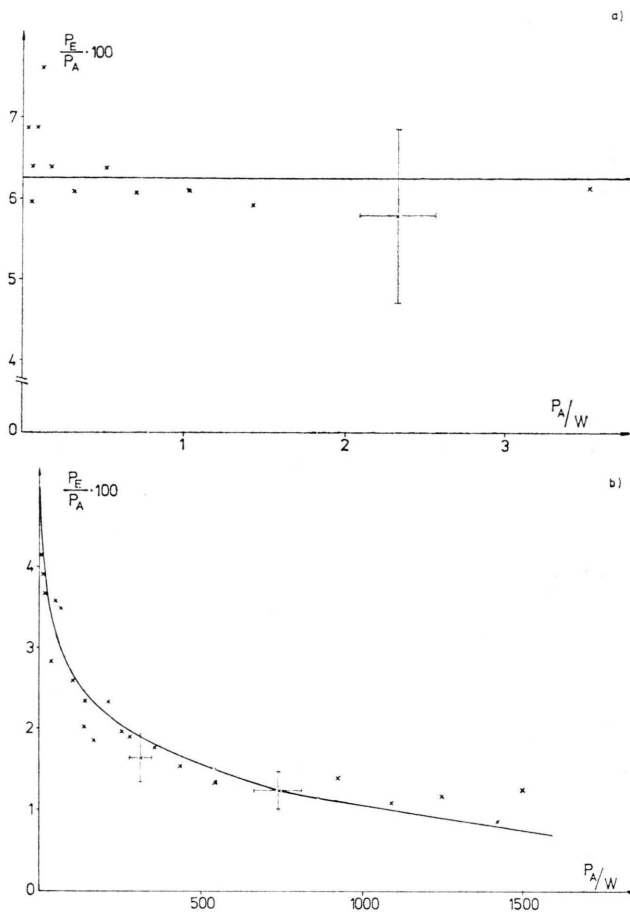


Abb. 3. Wie Abb. 2 in linearer Darstellung.

dichte von der angebotenen Blindleistung beobachtet (Abb. 4a und 4b). Auf der Ordinate ist die Elektronendichte im Absorptionsmaximum aufgetragen. Ähnlich wie im vorigen Bild wird im kleinen Leistungsbereich eine konstante Dichte von etwa $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ beobachtet. Man sieht, daß der Schwellwert für das Absinken der Elektronendichte in der gleichen Größenordnung wie der Schwellwert des fallenden Wirkungsgrades liegt; eine halb-logarithmische Darstellung analog Abb. 2 läßt allenfalls einen höheren Schwellwert für den Abfall der Elektronendichte (bei etwa 5 W Senderleistung) erkennen. Weiter ist zu beobachten, daß nach einem relativ schmalen Übergangsgebiet ab etwa 100 W Blindleistung sich wieder eine — abgesenkte — konstante Elektronendichte einstellt (etwa $1,2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$).

Dies konnte früher nicht beobachtet werden, da bereits vor Erreichen der konstanten Elektronen-

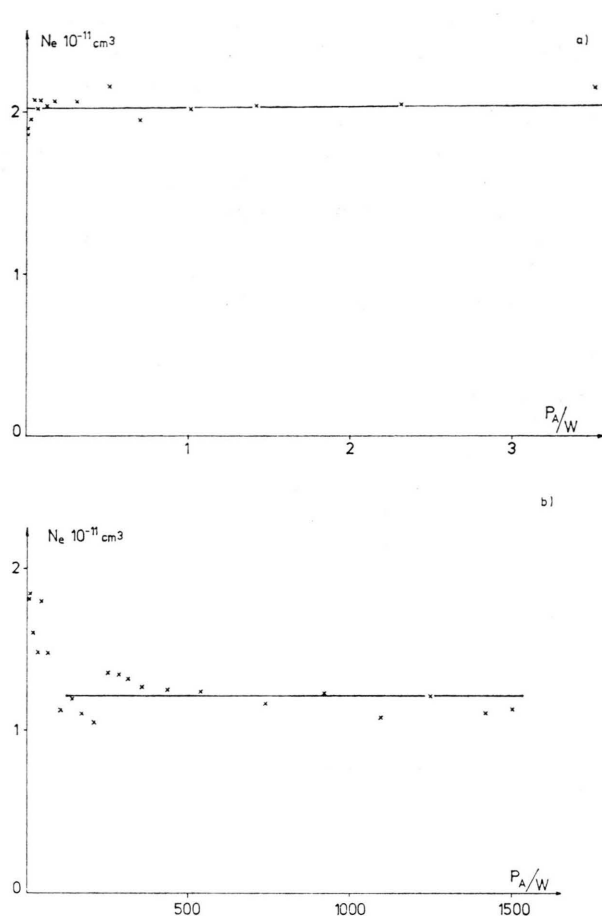


Abb. 4. Elektronendichte als Funktion der Blindleistung.

dichte die Mikrowellenentladung nicht mehr gezündet werden konnte. Dies Verlöschen der Entladung bei etwa 200 Watt Blindleistung trat bei den hier vorgelegten Untersuchungen nicht mehr auf. Das ist wahrscheinlich auf die geänderte Magnetfeldkonfiguration zurückzuführen (größerer homogener Bereich). Hierdurch erklärt sich auch die gegenüber den früheren Messungen etwas verminderte Elektronendichte, da das Plasmavolumen vergrößert wurde. Überraschend ist, daß durch eine so geringfügige Änderung des Plasmaeinschlusses eine so deutliche Verbesserung des Zündverhaltens erreicht wurde.

Die beschriebene Änderung des Plasmaverhaltens bei gewissen Schwellwerten der angebotenen Leistung und damit der eingekoppelten Energie deutet stark auf die Anregung von Störungen infolge nichtlinearer Effekte hin. Die genaue Art dieser Mecha-

nismen kann jedoch aus diesen Untersuchungen nicht geklärt werden. Hierzu soll ein im Aufbau befindliches Experiment mit erweiterten diagnostischen Möglichkeiten dienen.

Eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Elektronendichten im Absorptionsmaximum ergibt das in den Abb. 5a und 5b dargestellte Plasmaverhalten (dabei ist angenommen, daß der Grad der Leistungseinkopplung sich proportional zur Elektronendichte verhält [1]). Es scheint, daß auch der Wirkungsgrad der Hochfrequenzeinkopplung in diesem Fall einer Sättigung zustrebt, die bei etwa 2% der angebotenen Blindleistung liegt (also deutlich über den unkorrigierten Werten von 1%). Damit wird der Wirkungsgrad, der sich bei Radiofrequenzeinkopplung außerhalb des Resonanzgebietes einstellt, beträchtlich überschritten.

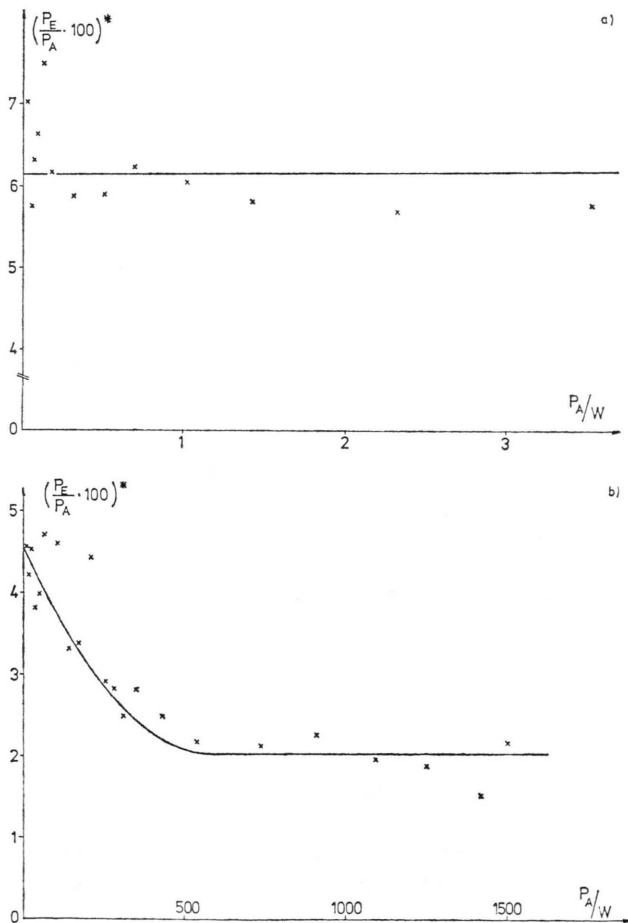


Abb. 5. Wie Abb. 3; jedoch Normierung auf gleiche Elektronendichte.

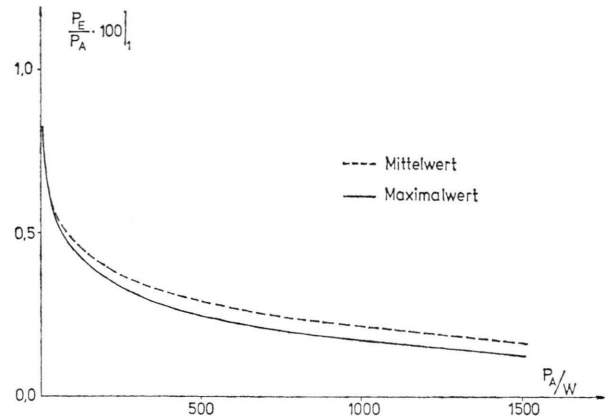


Abb. 6. Prozentual eingekoppelte Wirkleistung (auf 1 normiert) als Funktion der Blindleistung.

Im letzten Bild (Abb. 6) ist gezeigt, daß die (etwas vereinfachende) Untersuchung des Resonanzmaximums bereits ausreichend genau die Leistungsabhängigkeit des Hochfrequenzwirkungsgrades beschreibt. Hier ist (durchgezogen) die Änderung der prozentual eingekoppelten Leistung in der Spitze der Absorption dargestellt. Gestrichelt ist die Kurve, die man erhält, wenn man diese prozentuale Leistung gemittelt über den gesamten Resonanzbereich (9 ... 40 MHz) betrachtet. Dabei ist der Kurvenverlauf unabhängig davon, ob die Mittelung nach Integrieren des Kurvenverlaufes oder durch einfache Mittelwertbildung der Meßpunkte gewonnen wird. — Die Normierung wurde in beiden Fällen dadurch gewonnen, daß der Wirkungsgrad der Hochfrequenzeinkopplung bei 1 W Blindleistung gleich 1 gesetzt wurde. — Die beobachteten Abweichungen sind nur gering und liegen innerhalb der Fehlergrenzen. Die Ergebnisse sind also keineswegs von der Art der Auswertung abhängig.

4. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden:

Bei der Einkopplung von Radiowellen im Gebiet der unteren Hybridfrequenz ändert sich das Verhalten eines Plasmas mit niedrigen Stoßfrequenzen und erhöhten Elektronentemperaturen deutlich, sobald die angebotene Hochfrequenz-Blindleistung (bzw. die damit verbundene Wirkleistung) bestimmte Schwellen überschreitet. Auch jenseits dieser Schwellen scheint jedoch der Wirkungsgrad der Hochfrequenzheizung nicht auf Null abzu-

sinken, sondern einem Sättigungswert zuzustreben, wenn man das Absinken der Elektronendichte (stärkere Teilchenverluste) berücksichtigt. Das deutet darauf hin, daß angefachte Störungen sich nicht so stark auswirken wie früher [1] befürchtet. Somit könnte sich die resonante Hochfrequenzheizung im Bereich der unteren Hybridfrequenz auch für bereits aufgeheizte Plasmen bewähren,

zumal die Leistungseinkopplung im Resonanzgebiet immer noch deutlich erhöht ist. Zukünftige Untersuchungen mit erweiterter Diagnostik werden sich mit den Mechanismen der beobachteten Störungen befassen.

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 162 „Plasmaphysik Bochum/Jülich“ durchgeführt.

[1] G. Glomski, B. Heinrich u. H. Schlüter, Z. Naturforsch. **31a**, 1566 (1976).

[2] G. Glomski, B. Heinrich u. H. Schlüter, Z. Naturforsch. **31a**, 1551 (1976).

[3] G. Glomski, B. Heinrich u. H. Schlüter, Z. Naturforsch. **31a**, 1559 (1976).