DESY M-86-08
Juli 1986

INFRAROT-TEMPERATUR-MESSUNGEN AN HF-HOCHLEISTUNGSKOPPLER

von

B. Dwersteg

DESY behält sich alle Rechte für den Fall der Schutzrechtserteilung und für die wirtschaftliche Verwertung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen vor.

DESY reserves all rights for commercial use of information included in this report, especially in case of filing application for or grant of patents.

"Die Verantwortung für den Inhalt dieses
Internen Berichtes liegt ausschließlich beim Verfasser"

Infrarot-Temperatur-Messungen an HF-Hochleistungskoppler

Abstract

The main coupler window construction of the HERA superconducting 4cell 500 MHz cavity will be very similar to that which already exists for the normal conducting 350 MHz LEP cavities. In order to gain experience with this type of window at DESY, one of the LEP couplers was modified to 500 MHz and matched to a PETRA 5cell cavity. A high power test to 150 kW transferred rf power was performed. The use of an infrared temperature measurement sensor allowed derivation of quantitative results concerning losses, temperatures and cooling data of the window. A next step will be a test of the window with PETRA cavity under real storage ring conditions.

Einleitung

Die beim DESY in der Entwicklung befindlichen 4zelligen Supraleitungsstrukturen für den Einsatz in HERA sollen mit einem Hauptkoppler ausgerüstet werden, dessen Fensteranordnung im wesentlichen der bei CERN für LEP entwickelten gleicht. Dabei handelt es sich um einen Keramikrohrzylinder, der im Hohlleiter-Koax-Übergang des Kopplers noch innerhalb des Hohlleiters den Koaxialbereich vakuumdicht gegen den Hohlleiter abschließt. Das bedeutet für das supraleitende Cavity ein Fenster im Warmen.
Da der Bruch eines HF-Fensters beim Betrieb eines supraleitenden Cavitys im Speicherring wesentlich unangenehmere Folgen nach sich zieht als der eines normal leitenden Cavitys, ist die Frage der Betriebssicherheit hier ebenfalls kritischer. Daher sind eine Reihe von Diagnosemaßnahmen geplant, um einen kritischen Betriebszustand des Fensters rechtzeitig zu erkennen. Als erster Schritt in dieser Richtung wurde ein LEP-Koppler vom CERN ausgeliehen, auf eine Betriebsfrequenz von 500 MHz modifiziert und an ein 5zelliges PETRA-Cavity angepaßt.
Ziele eines anschließenden Hochleistungstests dieses Kopplers mit PETRA-Cavity waren dann:

1. Gewinnung erster Betriebserfahrungen mit einem Fenster dieses Typs

2. Test einer speziell zu diesem Zweck gebauten Infrarot-Temperatur-Meßeinrichtung, die berührungslos die Betriebstemperatur der Keramik mißt, gedacht als spätere Dauerüberwachungseinrichtung

3. Daraus Gewinnung von Informationen über Verluste und Erwärmung der Fenster, abhängig von HF-Leistung und Kühlung

4. Gleichzeitiger Test eines beim DESY entwickelten Kapton-Hohlleiterfensters[1)] bei hoher HF-Leistung als Gasbarriere zwischen Vakuumfenster und Hohlleiter.

Es wird daran gedacht, den Raum zwischen Fenster und Gasbarriere als Pufferraum mit einem speziellen sauberen Gas für den Fall eines Fensterbruchs zu füllen.

Koppler-Hochleistungstest

Der prinzipielle Testaufbau ist im Bild 1 festgehalten. Die Kopplung ans PETRA-Cavity erfolgt durch eine induktive Schleife an der Mittelzelle. Beim supraleitenden HERA-Cavity wird die Schleife wegfallen. Der Koppler soll dann kapazitiv vom Strahlrohr einer Endzelle her die elektrischen Felder des Cavitys anregen. Die Transformation vom Hohlleiter WR 1800 auf 4 1/2" Koax geschieht mittels Doorknob. Innerhalb des Transformationsbereichs bildet die Zylinderkeramik aus Al_2O_3 das Hochvakuumfenster für den HF-Leistungstransport vom Wellenleiter zum Cavity hin. Die Maße der Keramik sind: 114 mm außen, 103 mm innen bei einer Länge von 120 mm. Charakteristisch für den LEP-Koppler ist die Halterung der Keramik durch zwei dünnwandige Metallhalteringe an jeder Seite: Vakon an die Keramik angelötet und Edelstahl an das Doorknobteil angelötet, die beim Einbringen der Keramik dann an der frei zugänglichen umlaufenden Schneide miteinander verschweißt werden. Innen- und Außenleiter des Koax sind wassergekühlt. Die Keramik ist nur durch Luft kühlbar, wobei der Luftkühlstrom vertikal zur Bildebene durch 18 mm Öffnungen in den Hohlleiterschmalseiten die eine Seite der Keramik direkt anströmt. Der im Windschatten gelegene Teil der Keramik wird durch Wärmeleitung in der Keramik und durch die entstehenden Turbulenzen des Luftstroms gekühlt. Weitere wesentliche Testkomponenten sind die Gasbarriere aus Kaptonfolie und der Infrarotsensor, der eine berührungsfreie Messung der Keramikoberflächentemperatur während des Hochleistungsbetriebes wahlweise über Schreiber oder Zeigerablesung gestatten sollte. Die Anzeige entspricht der gesamten Infrarotstrahlung des für den Sensor sichtbaren Oberflächenbereiches. Der Test fand auf einem speziell für die Konditionierung von Cavities und Kopplern beim DESY geschaffenen prozessorierten Teststand statt. Während des gesamten Tests wurde der Koppler bei Anpassung ans Cavity betrieben. In einer ersten Testphase wurde die Kühlluftzufuhr für das Keramikfenster unterbrochen. Ohne die Kühlluft, die auch den Hohlleiter von innen kühlt, erreicht der Hohlleiter bei 26°C Raumtemperatur mit 40 kW ins Cavity übertragener Leistung nahe dem Cavity eine Temperatur von etwa 34° C. Dann erreicht das Keramikfenster eine Temperatur von 56° C, d.h. eine Temperaturerhöhung von 22° über Umgebung. Höhere Leistungen wurden ohne Luftkühlung nicht gefahren.

Koppler und Cavity ließen sich mit Luftkühlung des Kopplers nach einem am Mikroprozessor vorgegebenen Konditionierungsprogramm problemlos bis auf 120 kW ins Cavity übertragene Leistung fahren. Die Cavity-Leistung wurde kalorimetrisch gemessen. Diese Leistung wurde über zwei volle Tage gehalten. Bei einer Kühlluft-temperatur von 33° C erreichte das Keramikfenster auf der direkt angeströmten

Seite 53° C, auf der gegenüberliegenden Seite 65° C. D.h., daß sich innerhalb der Keramik ein Temperaturgradient von 12° C aufbaute. Diese Werte wurden mittels Kontaktthermometer nach Abschalten der HF-Leistung von den Luftzufuhröffnungen aus gemessen. Nach zwei Tagen mit 120 kW Dauerleistung wurde der Aufbau noch 20 Stunden lang bei einer Dauerleistung von 140 kW im Cavity ohne erkennbare Probleme betrieben.

Dieser Leistungspegel erwies sich für den getesteten Koppler als die Grenze dessen, was zuverlässig erreichbar war. Bei weiterer Leistungssteigerung bis auf 150 kW im Cavity ergaben sich Hohlleiterdurchschläge und als Geräusch hörbare Überschläge im Luftbereich des Kopplers nach etwa 10 min Betrieb bei dieser Leistung. Daher wurde der Test dann beendet. Bis dahin hatten sich auf der Keramik Temperaturen zwischen 57° C auf der gekühlten und 68° C auf der ungekühlten Seite eingestellt. Instabilitäten des Drucks im Cavity wurden während des ganzen Tests nicht beobachtet. Bei 150 kW im Cavity waren die Verluste in Innen- und Außenleiter-Wasserkühlung zusammen 600 W.

Nach Demontage des Kopplers zeigten sich auf beiden Halteringschweißkanten viele Durchschlagspuren, besonders im nicht direkt durch die Kühlluft angeströmten Bereich. Vakuumseitig wies der Koppler außer einer Aufrauhung der Außenleiteroberfläche in mm² Größe nahe dem Keramikzylinder keine Durchschlag- oder Brennspuren auf. Es gab jedoch in diesem Bereich drei schwarz bedampfte Stellen, die auf eine Ausgasung des von den Halteringen gebildeten Sackes schließen lassen. Tatsächlich ist nämlich der Spalt zwischen Keramikzylinderkante und Koax-Außenleiter viel kleiner als in Bild 1 angedeutet und besitzt drei erweiterte Pumpöffnungen zum Vakuum hin. Die direkte Temperaturmessung des Fensters mit Infrarotthermometer zeigte, daß bei Beschränkung der Temperaturmessung auf die Erwärmung der Kühlluft kaum wesentliche Rückschlüsse gezogen werden können. Frühere Tests[1)] hatten schon gezeigt, daß eine Kapton-Gasbarriere von etwa 0,2 mm Stärke im WR 1800 bis zu Vielfachen der hier gefahrenen Leistung und bis zu 1 bar Druckdifferenz belastbar ist. Es zeigten sich jedoch nach diesem Test auch einige Überschlagspuren auf dem Flansch, in dem die Folie eingespannt war und einige kleine Löcher nahe der Einspannung. Aufgrund kontinuierlicher Temperaturmessung der Keramikoberfläche war es möglich, Temperaturen und Temperaturzeitkonstanten zu messen. Daraus lassen sich die HF-Verluste in der Keramik und die zu erwartenden Betriebstemperaturen in Abhängigkeit von der Kühlung ermitteln.

HF-Verlustleistung und Kühlung des Keramikfensters

Die Aufheizung der Keramik ohne Luftkühlung durch HF-Leistung und die Abkühlung nach Abschalten der HF ergaben im Mittel e-Funktionen mit der Zeitkonstanten 750 sec. Bei der Aufheizung erwärmte sich jedoch nicht nur die Keramik, sondern auch der Hohlleiter. Für die leistungsabhängige Temperaturerhöhung der Keramik ist deshalb die Temperatur des umgebenden Hohlleiters der Bezugspunkt. Diese erhöhte sich im Test um etwa 0,2° C je kW Cavity-Leistung gegenüber der Raumtemperatur.

Die Erwärmung der Keramik ergab sich ohne Luftkühlung zu 0.52° C über Hohlleitertemperatur je kW ins Cavity übertragene Leistung.

Da die Zeitkonstante der Hohlleitererwärmung[2)] wesentlich größer als 750 sec ist, wird im folgenden grob vereinfachend angenommen, daß nur die Keramik die Zeitkonstante bestimmt.

Es seien

ΔT mittlere Temperaturänderung der Keramik gegenüber der Umgebung

S der Wärmeleitwert zwischen Keramik und Umgebung

P die Keramikverlustleistung infolge von HF-Feldern

t der Zeitparameter

W der Energiezuwachs in der Keramik entsprechend ΔT

$\gamma = 0{,}2$ cal/g °C
die spezifische Wärme der Keramik

$\rho = 3{,}9$ g/cm³
die spezifischen Dichte der Keramik

$V = 226$ cm³
das Volumen der Keramik

Dann gilt

$$W = \gamma\rho V \cdot \Delta T = 738 \text{ W sec} \cdot \Delta T/°C$$

Aus $\partial W/\partial t = - S \cdot \Delta T$ erhält man dann für den Aufheizfall

$$\Delta T = P/S \cdot (1-e^{-t/\tau}),$$

für den Abkühlfall nach Abschalten der HF

$$\Delta T = P/S \cdot e^{-t/\tau}$$

mit $\tau = \gamma\rho V/S = \dfrac{738 \text{ W sec}/°C}{S}$

Dabei ist P/S die durch die Verlustleistung P in der Keramik erzeugte Endtemperatur. Ohne Luftkühlung ergibt sich also eine Wärmeableitung der Keramik zum Hohlleiter hin von $S \approx 1$ W/°C wegen $\tau \approx 750$ sec. Die Erwärmung der Keramik von 0.52° C/kW liefert demnach Übertragungsverluste von P = 0.52 W je kW.
Eine reflexionsfrei ins Cavity übertragene Leistung von 120 kW - wie für das HERA-Supraleitungs-Cavity vorgesehen - würde also im Kopplerfenster eine Verlustleistung von 62 W und mithin eine Temperaturerhöhung von 62° C über Hohlleitertemperatur erzeugen, falls die Luftkühlung ausfällt. Es wären also etwa 100°C über Raumtemperatur zu erwarten, wenn der Verlustfaktor der Keramik konstant bleibt.
Zieht man Material und Abmessungen der Halteringe in Betracht, so ergibt jeder der beiden Halteringübergänge einen Wärmeleitwert von nur 70 mW/°C zum Hohlleiter hin. Der gemessene Wert von 1 W/°C zeigt, daß auch ohne Luftstromzuführung der sich zusätzlich einstellende Konvektionsanteil schon effektiver kühlt als die Halteringkonstruktion.
Berechnet man die elektrische Spitzenfeldstärke und Spitzenspannung von WR 1800 bei Übertragung von 120 kW mit 500 MHz, so erhält man $\hat{E}$ = 480 V/cm entsprechend 11 kV. Die maximal zu erwartende Verlustleistung P in der Keramik läßt sich dann mit

$$\mathrm{tg}\,\delta\,(Al_2O_3,\ 300\ K) = 3\cdot 10^{-4},\quad \varepsilon_r(Al_2O_3,\ 300\ K) = 9$$

folgendermaßen abschätzen

$$P = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mathrm{tg}\,\delta \cdot E_{eff}^2 \cdot V$$

Man erhält unter der Annahme, daß die gesamte Hohlleiterspannung an der Keramik anliegt:

P = 71 W mit $\hat{E}$ = 11 kV/12 cm,
unter der Annahme, daß sich nur die Hohlleiterfeldstärke überträgt:
P = 20 W mit $\hat{E}$ = 480 V/cm
bei 120 kW reflexionsfrei übertragener Leistung.
Der Impedanzsprung im Doorknobbereich legt (ohne genauere Untersuchungen) diese beiden Abschätzungen für die Verlustleistung nahe. So liegt der über die Temperaturmessung ermittelte Wert der Verlustleistung von 62 W recht gut im Erwartungsbereich.

Bei Leistungen über 40 kW wurde das Keramikfenster luftgekühlt. Der über den WR 1800 und die beiden Luftanschlußöffnungen eingestellte Differenzdruck lag in der Größenordnung 50 mbar. Die Luftzuführungstemperatur war etwa im Bereich 31° C ... 34° C. In dieser Luftströmung lag der mittlere Temperaturanstieg der Fensterkeramik bei etwa 0.22° C je kW Übertragungsleistung. Außerdem ergab sich zwischen Wind- und Windschattenseite der Keramik ein Temperaturgradient von etwa 0,1° C/kW. Die Wärmeleitung der Keramik entspricht etwa der von Edelstahl. Aus den Beziehungen $S = P/\Delta T$ und $S = \gamma\rho V/\tau$ ergab sich in grober Übereinstimmung $S = 2.5$ W/°C als Wärmeableitung im Luftstrom. Da das Verhältnis der vom Luftstrom überstrichenen Metallflächen zur Keramikoberfläche größer als 10 ist, konnten aus der Erwärmung der Kühlluft (ca. 10° C bei 150 kW und 35° C Hohlleitertemperatur) keine direkten Rückschlüsse auf die Keramiktemperatur gezogen werden.

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Der als Vortest für den Bau des HF-Hochleistungseinkopplers eines supraleitenden HERA-Cavitys durchgeführte Test mit einem "LEP"-Leistungskoppler zeigte, daß dieser Kopplertyp die Übertragung von 120 kW, für die er gebaut ist, problemlos auch bei 500 MHz leistet. Als Leistungsbegrenzung ergaben sich Überschläge bei 150 kW übertragener Leistung. Die Überschläge erfolgten - wie vorhersehbar - an der Schweißkante der Keramikhalteringe.

Eine als Dauerüberwachung geplante Infrarot-Temperatur-Meßeinrichtung für das Keramik-Vakuum-Fenster des Kopplers wurde erstmals getestet. Neben der Möglichkeit, einem Fensterbruch, der sich durch ungewöhnliche Erwärmung ankündigt, rechtzeitig auszuweichen, wurde es durch Kenntnis der Keramikoberflächentemperatur möglich, Zahlen für Leistungsumsatz, Kühlparameter und Betriebstemperaturen der Keramik anzugeben. Das mitgetestete beim DESY als Gasbarriere bis zu 1 bar Differenzdruck für WR 1800 entwickelte Fenster aus Kaptonfolie[1)] (Polyimid) erwies sich von der HF-Belastbarkeit her als brauchbar, den für den Fall eines Fensterbruchs benötigten Pufferraum zu schaffen. Es muß jedoch noch getestet werden, ob es einer Schockevakuierung des Pufferraums, wie sie bei Fensterbruch auftreten könnte, standhält.

Aus der Untersuchung der HF-Leistungsabhänigkeit der Keramiktemperatur ergibt sich mit 120 kW reflexionsfrei übertragener HF-Leistung ohne zusätzliche Luftstromkühlung ein zu erwartender Temperaturanstieg der Keramik von 100° C über Raumtemperatur, wenn man annimmt, daß der dielektrische Verlustfaktor konstant bleibt. Dabei würde der Koppler vermutlich noch nicht beschädigt werden. Aber

schon die Notwendigkeit der Titanisierung der Keramikoberfläche zur Erreichung der hohen übertragbaren HF-Leistung ohne vakuumseitige Entladungs- und Bedampfungseffekte läßt eine möglichst gute Kühlung ratsam erscheinen. Die beobachtete Leistungsbegrenzung durch die elektrische Feldstärke legt es nahe, das Fenster bei Betrieb des Kopplers mit einem fehlangepaßten Cavity in die Nähe des Strommaximums der Stehwelle zu bringen.

Literatur

1) DESY, Hamburg Hohlleiterfenster, Patent BRD Nr. G8604 529.6 vom 20.2.

2) B. Dwersteg, G. Nicholls
Temperaturmessung an Hohlleiter WR 1800 bei hohen HF-Leistungen f = 500 MHz, DESY M/VM-83/1

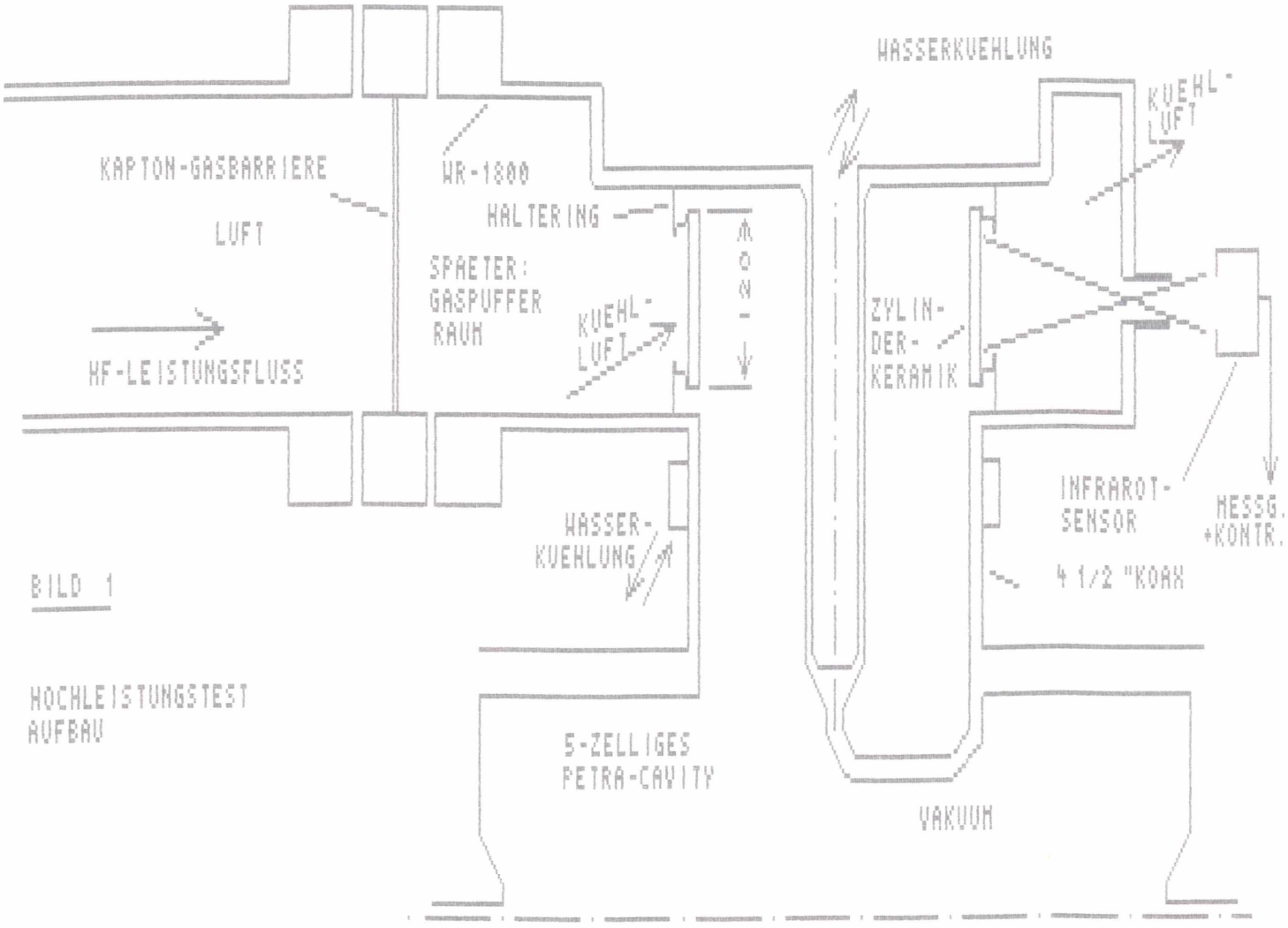

BILD 1

HOCHLEISTUNGSTEST AUFBAU