

Interner Bericht
DESY H3-73/9
September 1973

DESY-Bibliothek
22. FEB. 1974

Eine Hochfrequenzanordnung
zum Speichern von Protonen
in DORIS

von

H. Gerke

gleichlautend mit Technischer Notiz H3-20

1950

1950

1950

1950

1950

H. Gerke

4. September 1973

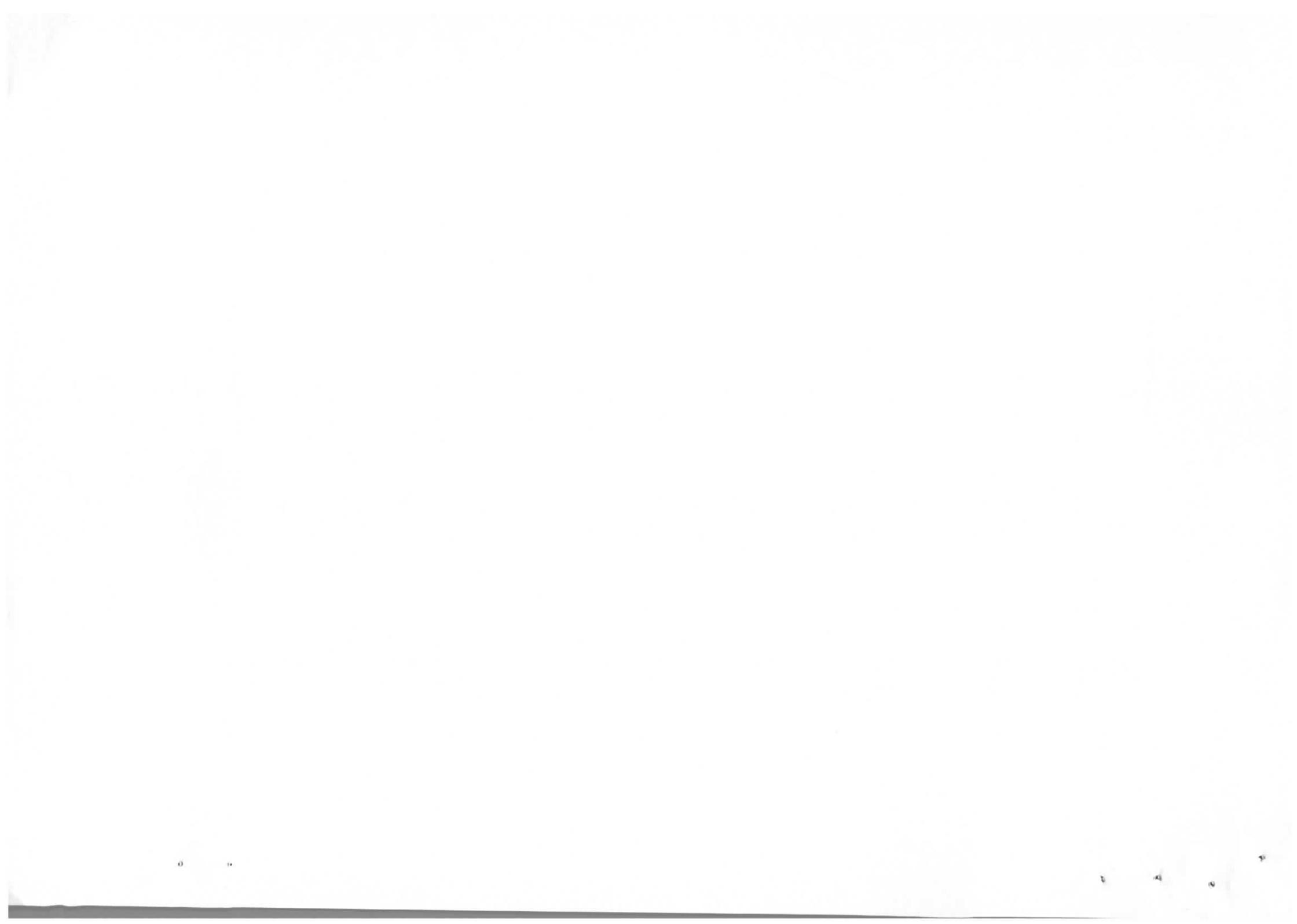
T e c h n i s c h e N o t i z

H 3 - 20

Eine Hochfrequenzanordnung

zum Speichern von Protonen

in DORIS



I n h a l t

	Seite
I. Einleitung	1
II. Resonator- und Verstärkeranordnung	1
III. Frequenzabstimmung des Resonators	5
IV. Konstruktiver Aufbau des Resonators	8
V. Das Hochfrequenzsystem	8
Literatur	10

4

2

11

0

5

0

I. Einleitung

In ⁽¹⁾ wurden die für das HF-Stacking in DORIS benötigten Hochfrequenzspannungen berechnet. Im vorliegenden Bericht wird der hierfür benötigte Resonator und Verstärker berechnet, ein konstruktiver Aufbau und eine mögliche Schaltungsanordnung untersucht.

Für den konstruktiven Aufbau wurde eine möglichst platzsparende, technologisch einfache Lösung angestrebt.

II. Resonator- und Verstärkeranordnungen

Für das Speichern von Protonen in DORIS wird bei einer Harmonischenzahl von $h = 10$ eine Hochfrequenzspitzenspannung ⁽¹⁾ von 500 V an einer Impedanz von 500 Ω benötigt. Die Frequenz des Systems ist

$$f_{\text{HF}} = f_0 \cdot h = \frac{\beta \cdot c \cdot h}{U}$$

Für einen injizierten Protonenstrahl von $p = 4 \text{ GeV}/c$ ergibt sich dann bei $\beta = 0,974$, $h = 10$ und $U = 288 \text{ m}$ eine Frequenz von 10 MHz.

Der Resonator kann als ferritbeladener, kapazitiv belasteter Koaxialschwingkreis, wie in ⁽²⁾ beschrieben, aufgebaut werden. Da für das Speichern von Protonen in DORIS nur eine geringe Spannung und damit ein kleiner magnetischer Fluß benötigt wird, soll hier ein Aufbau untersucht werden, bei dem die Induktivität und die Kapazität des Kreises getrennt sind. Dieser Aufbau hat den Vorteil, daß die Induktivität aus mehreren Windungen besteht und damit der Strom durch die Röhren des Gegentaktverstärkers entsprechend kleiner ist. Es können daher kleinere Röhren verwendet werden. Außerdem läßt sich auf diese Weise ein sehr kurzer Resonator herstellen.

Die prinzipielle Schaltung eines solchen Resonators zeigt Abb. 1. Der Schwingkreis besteht aus einer Induktivität L_K (eine Wicklung auf Ferritringen) und einer Kapazität C_K . Das Gehäuse mit Vakuumkammer und Gap stellt die Sekundärwicklung des durch die Wicklung auf den Ferritkernen gebildeten

und die Kreiskapazität (einschließlich der Störkapazitäten)

$$C_K = \frac{1}{\omega^2 L_K} = \frac{1}{(2\pi)^2 \cdot 10^{14} \cdot 3 \cdot 10^{-6}} = 83 \cdot 10^{-12} \text{ F} .$$

Die Kreisimpedanz ist

$$Z_K = \sqrt{\frac{L_K}{C_K}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 20^{-6}}{83 \cdot 20^{-12}}} = 190 \ \Omega .$$

Da die auf den Strahl transformierte Impedanz $Z_{\text{Str}} = 500 \ \Omega$ sein darf, ist der Resonanzwiderstand des Kreises $R_p = u^2 \cdot Z_{\text{Str}} \cdot 500 = 2000 \ \Omega$.

Die Güte des Kreises ist dann $Q = R_p / Z_K \approx 10$.

Da die Kreisverluste wahrscheinlich kleiner sein werden als es dem maximalen Resonanzwiderstand entspricht, muß der Kreis durch zusätzliche Beschaltung mit einem Widerstand R_p^* entsprechend bedämpft werden.

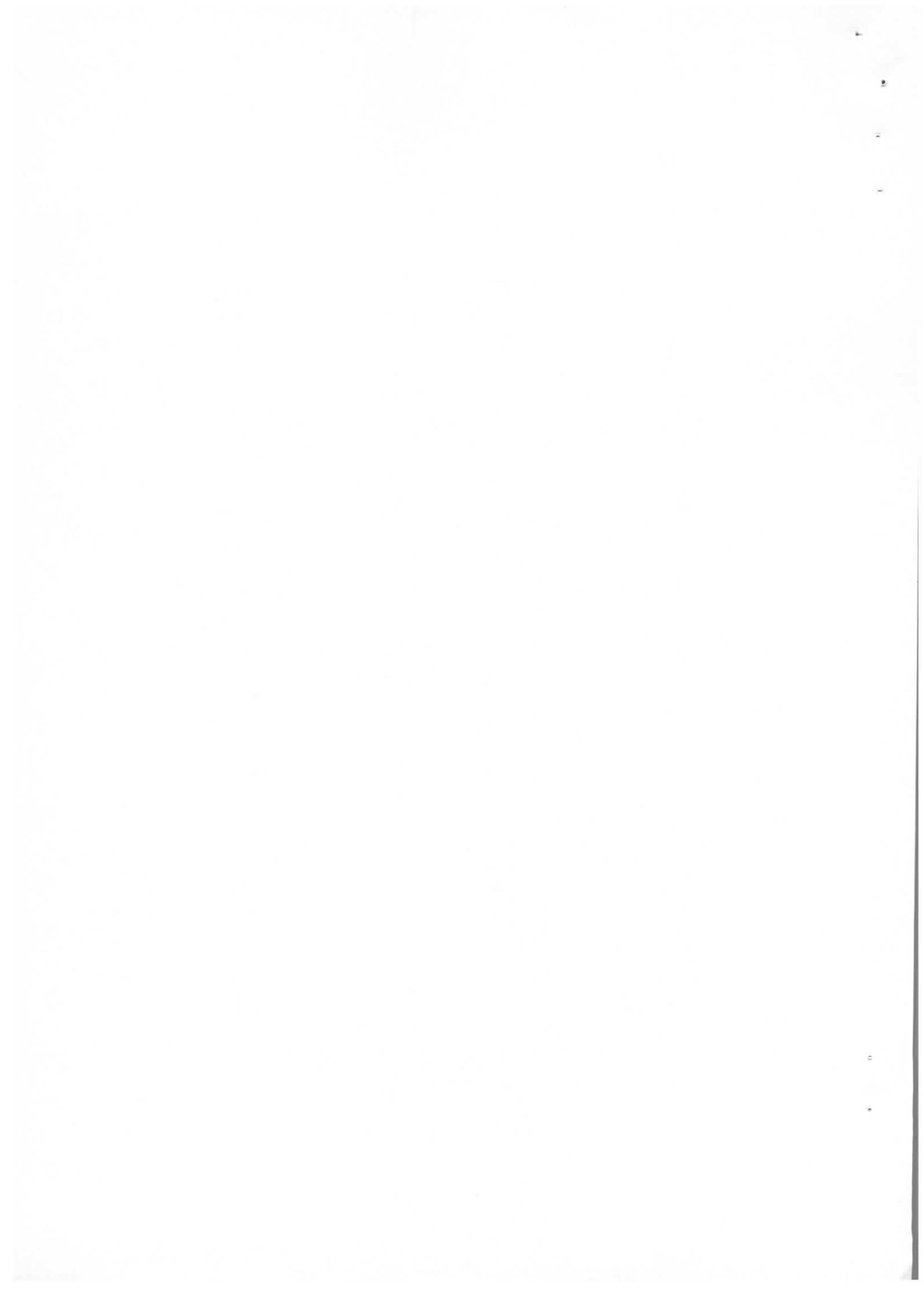
Zur Ansteuerung des Kreises soll ein röhrenbestückter Gegentaktverstärker verwendet werden. Bei einer Kreisspannung von 1000 V ($W = 2$) und einer Impedanz des Kreises von $R_p = 2000 \ \Omega$ ist der Spitzenanodenstrom der Röhren

$$\hat{J}_a = \frac{\hat{u}_K}{R_p} = \frac{1000}{2000} = 0,5 \text{ A} .$$

Die Verlustleistung des Kreises ist

$$P_v = \frac{\hat{u}_K^2}{2R_p} = \frac{1 \cdot 10^6}{2 \cdot 2 \cdot 10^3} = 250 \text{ W} .$$

Bei der Auswahl der Röhren soll auf kleine Abmessungen, kleine Heizleistung, möglichst geringe Eingangs- und Anodenkapazität und lange Lebensdauer geachtet werden. Um mit möglichst kleiner Steuerleistung arbeiten zu können, ist außerdem eine große Steilheit und Verstärkung nützlich. Als Röhre bietet sich daher eine moderne Metall-Keramik-Triode für höhere Frequenzen an. Nimmt man z. B. die Röhre TBL 2/300, die bei 10 MHz mit einer Anodenspannung von 2700 V betrieben werden darf, ist eine Aussteuerung auf 500 mA mit einer Gitterspannung von + 15 V und einem Gitterstrom von 0,05 A möglich. Die Anodenspannung ist



dann 1000 V. Die Röhre kann mit - 75 V bei einer Anodenspannung von 2000 V gesperrt werden. Die Betriebsspannung des Verstärkers ist für diese Daten 1500 V. Zur Einstellung des Arbeitspunktes bedarf es einer negativen Gitterverspannung von ca. 30 V.

Die Ansteuerung der Röhren soll über einen Gegentakttransformator erfolgen (Abb. 3). Bei der Auslegung des Transformators und der Gitterableitwiderstände muß ein Kompromiß zwischen kleiner Steuerleistung und möglichst guter Anpassung über den ganzen Aussteuerbereich der Röhren gefunden werden. Wird eine maximale Reflexion von $r = 0,2$ toleriert, so ist mit einem kleinsten Röhreneingangswiderstand von $R_i = u_g/i_g = 15 \text{ V}/0,05 \text{ A} = 300 \Omega$ ein Gitterableitwiderstand von $1,2 \text{ K}\Omega$ erforderlich. Soll der Verstärkereingang an eine Impedanz von 50Ω angepaßt werden, so muß der Transformator ein Übersetzungsverhältnis von 5 haben. Für eine Sekundärspannung von $U_{SS} = 100 \text{ V}$ ist dann eine Primärspannung von 20 V erforderlich.

Die Magnetisierungsimpedanz des Übertragers soll groß gegen 50Ω sein. Wählt man $X_M = 600 \Omega$, so ergibt sich für $f = 10^7 \text{ Hz}$ eine Induktivität von $L_M = 10 \cdot 10^{-6} \text{ H}$. Als Kern wird ein Ferritring aus 4C6 mit den Abmessungen $F_{Fe} = 2 \text{ cm}^2$ und $l_{Fe} = 75 \text{ cm}$ gewählt. Die Anfangspermeabilität ist $\mu_i = 150$. Daraus ergibt sich die Primärwindungszahl von

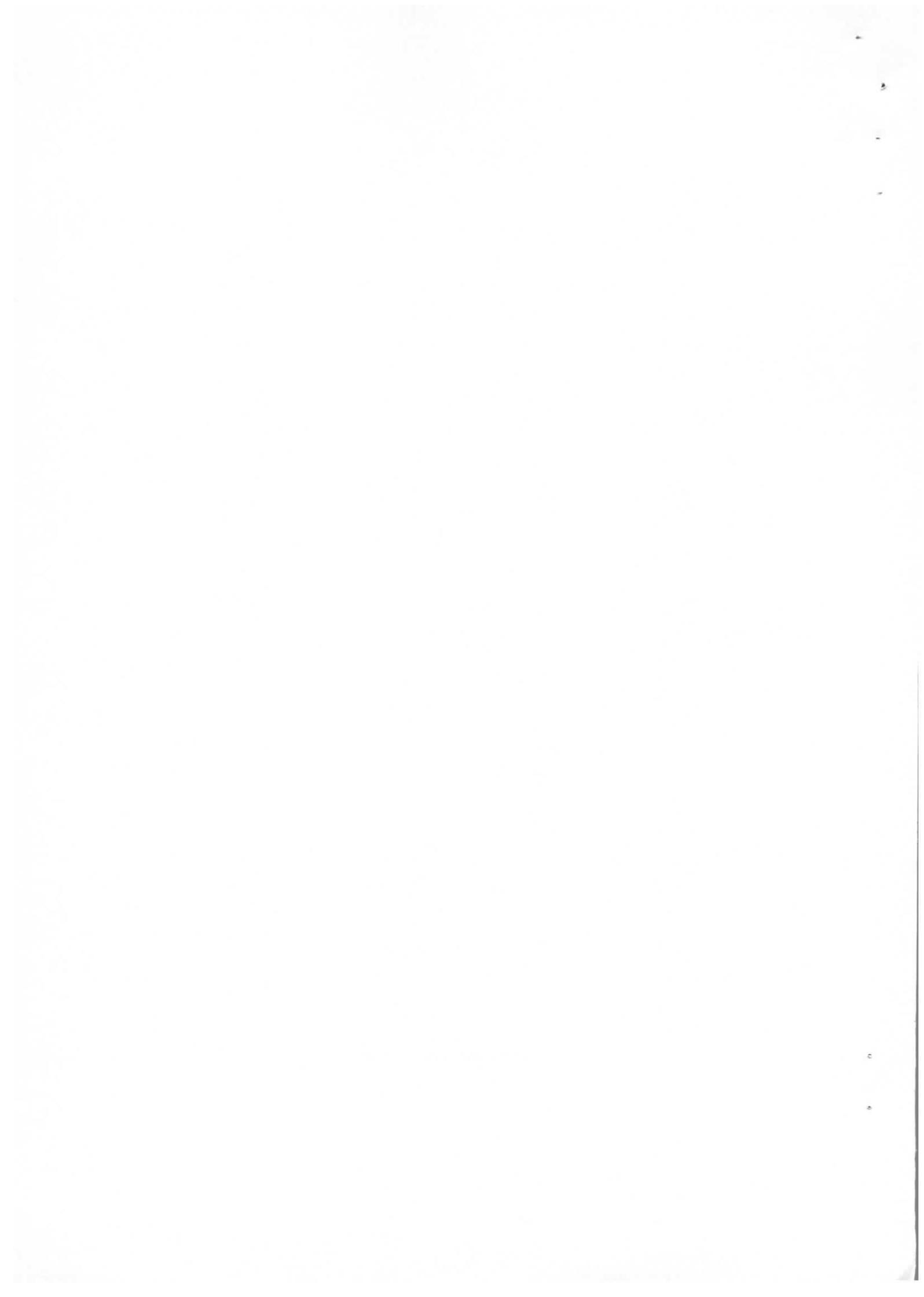
$$w_1 = \sqrt{L_H \cdot \frac{l_{Fe}}{F_{Fe}} \cdot \frac{1}{\mu \cdot \mu_r}} = 5 \text{ Wdg.}$$

Die Sekundärwindungszahl ist dann $\hat{u} \cdot w_1 = 25$.

Die Magnetisierungsinduktion ist

$$\hat{B} = \frac{\hat{u}/w}{F_e \omega} = \frac{20/5}{2 \cdot 2\pi \cdot 10^7 \cdot 10^{-8}} = 3 \text{ T}$$

Zur Ansteuerung des Gegentaktverstärkers wird ein Verstärker mit einer Ausgangsleistung von ca. 5 W benötigt.



III. Frequenzabstimmung des Resonators

Die Abstimmung des Resonanzkreises auf Resonanzfrequenz wird durch Änderung der Vormagnetisierung der Ferritkerne vorgenommen. Bei Änderung des Stromes in der Vormagnetisierungswicklung (Abb. 1) wird die Permeabilität (Abb. 2) der Ferritringe und damit der Wert der Induktivität und der Frequenz des Kreises geändert. Die Wicklung wird als Kreuzwicklung über den vier Ringen ausgeführt. Dadurch wird verhindert, daß in dieser Wicklung durch den Wechselstrom im Kern eine Hochfrequenzspannung induziert wird. Mit

$$L_K = \mu_0 \mu_r \frac{F_{Fe}}{l_{Fe}} w^2 \quad \text{und} \quad f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_K \cdot C_K}}$$

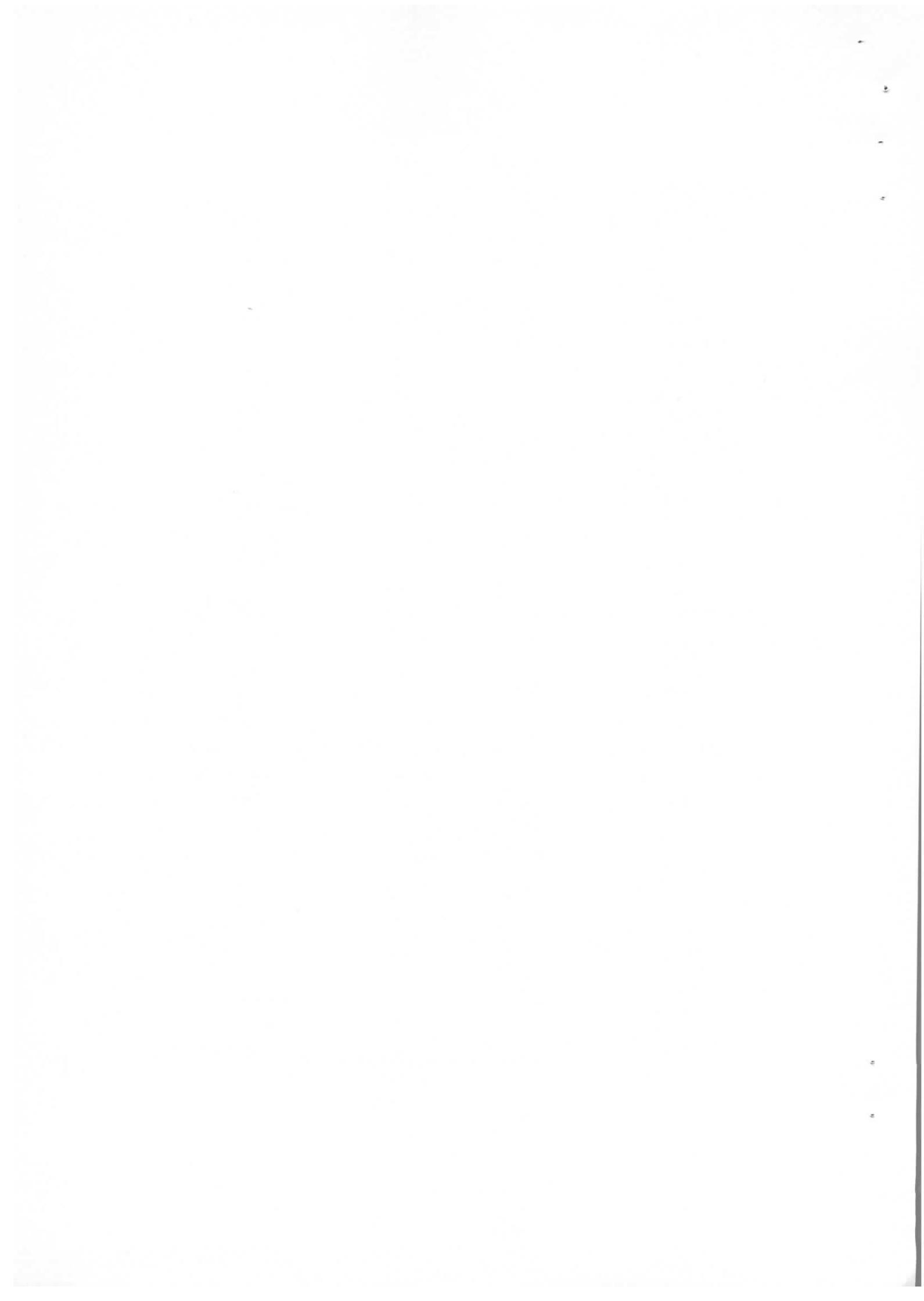
beträgt die Frequenzänderung durch Änderung der Permeabilität

$$\frac{f_{R1}}{f_{R2}} = \sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\mu_{r1}}}$$

Für den Impulsbereich von 1 GeV/c bis 4,5 GeV/c, in dem Protonen in DORIS gespeichert werden sollen, ergibt sich eine relative Geschwindigkeitsänderung von $\beta = 0,729$ bis $\beta = 0,979$ ⁽¹⁾. Die Frequenzvariation des Resonators muß daher einen Bereich von 7,6 MHz bis 10,2 MHz überstreichen.

Die Abstimmung des Resonators auf Resonanzfrequenz beim Synchronisieren auf Injektionsenergie und bei der Frequenzänderung während der "HF-Stacking" muß verhältnismäßig schnell erfolgen. Die erforderliche Frequenzänderung für das HF-Stacking ist für die Impulsbreite des Stacks von $(\Delta P/p)_S = 1\%$ im unteren Energiebereich maximal 4%, im oberen Energiebereich kleiner als 1% der jeweiligen Betriebsfrequenz. Wenn die Abstimmung im ganzen Variationsbereich jeweils durch Änderung des Vormagnetisierungsstromes erfolgen würde, wäre wegen der kleinen geforderten Einstellzeitkonstante $\tau_f = L_b/R_b$ eine relativ hohe Vormagnetisierungsleistung erforderlich.

Da die jeweilige Protonenoperationsenergie des Speicherringes bekannt ist, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Vormagnetisierungsleistung zu senken.



- a) Der durch Permeabilitätsänderung (Änderung der Kreisinduktivität) zu überstreichende Frequenzbereich des Resonators läßt sich durch Umschaltung von Kreiskapazität und Lastwiderstand verringern. Die Vormagnetisierungsleistung sinkt dann bei gegebener Einstell-Zeitkonstante quadratisch mit der Anzahl der Schaltstufen.

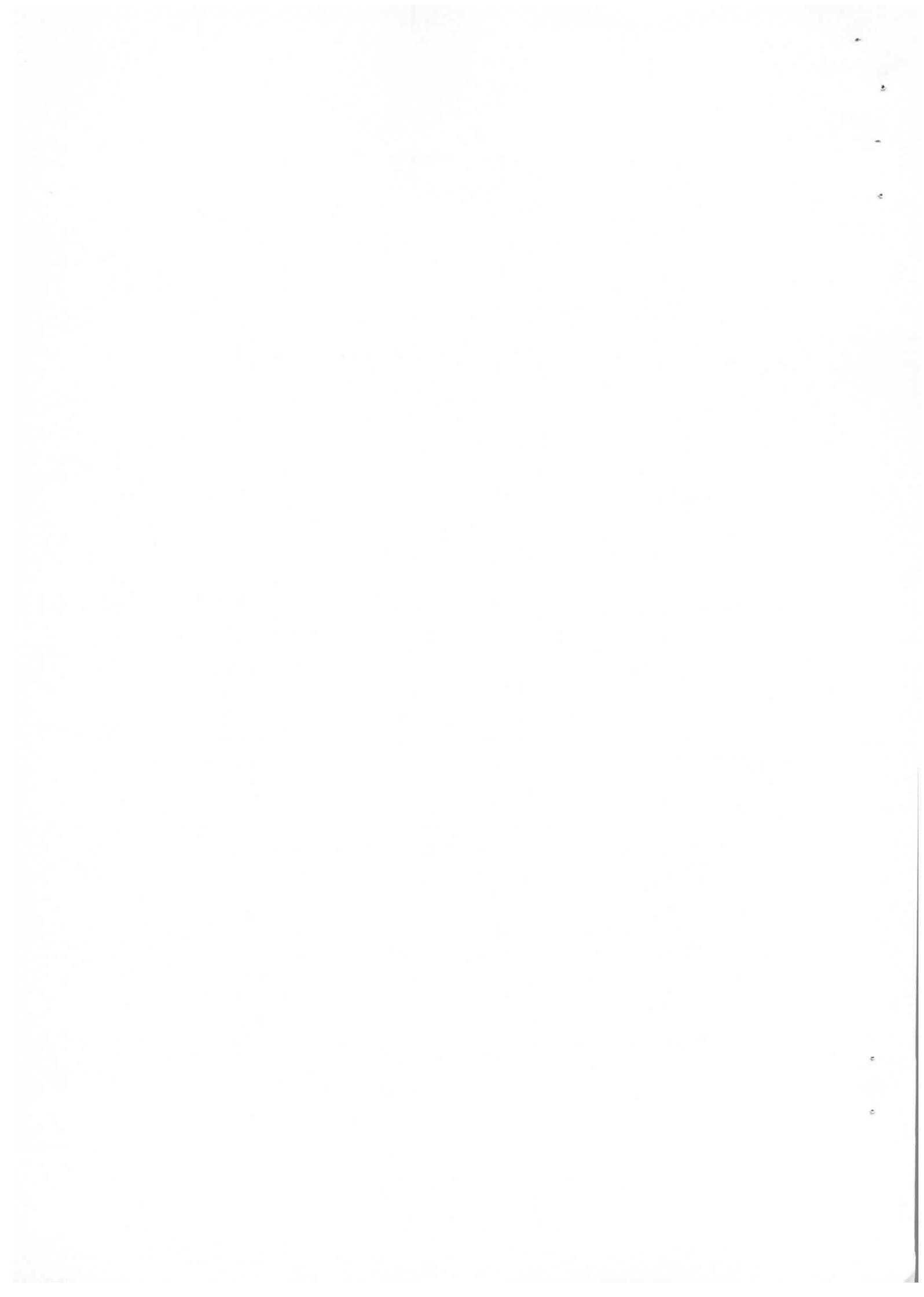
Für den Fall, daß der Frequenzbereich in 3 Stufen unterteilt wird, wurden die Resonatorberechnungen im Abschnitt II durchgeführt. Es ist dann

	P_1 bis P_2 (GeV/c)	β_1 bis β_2	f_{R1} bis f_{R2} (MHz)
Stufe 1	1 - 1,35	0,729 - 0,81	7,6 - 8,5
Stufe 2	1,3 - 2,0	0,79 - 0,905	8,25 - 9,5
Stufe 3	1,9 - 4,5	0,89 - 0,98	9,4 - 10,3

Die Permeabilität wird dann in jeder Stufe maximal von $\mu_{r1} = 150$ bis $\mu_{r2} = 115$ variiert.

- b) Eine andere Möglichkeit der Abstimmung, bei der die Vormagnetisierungsleistung noch erheblich kleiner ist, besteht darin, die Vormagnetisierungswicklung zu unterteilen. Durch die Wicklung mit vielen Windungen (sehr hohe Induktivität und sehr große Einstellzeitkonstante) wird die Betriebsfrequenz mit einer Genauigkeit von 2 % bis 3 % eingestellt. Diese Einstellung kann sehr langsam in einigen Sekunden erfolgen. Mit der zweiten Wicklung, die nur sehr wenige Windungen hat, wird die Frequenzänderung zur Synchronisation und während des Stacking vorgenommen.

Wird die kleine Wicklung für eine Impulsbreite von $(\Delta p/p) = 3\%$ ausgelegt, so ist bei kleinen Energien ($p \approx 1$ GeV/c) eine Frequenzänderung von maximal 1,2 % ⁽¹⁾ und eine Permeabilitätsänderung von ca. 2,5 % erforderlich. Bei hohen Energien ($p \approx 4,5$ GeV/c) ist die Frequenzänderung dann maximal 1,5 % und die Permeabilitätsänderung ca. 3 %.



Bei einer Güte des Resonators von $Q = 10$ ist die halbe Bandbreite $\Delta f = f_0/20 = 8 \cdot 10^6/2 \cdot 10 = 4 \cdot 10^5$ Hz. Für eine maximale Frequenzänderung von 1,2 % ist $\Delta f_v = 8 \cdot 10^6 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} = 10^5$ Hz. Der größte Verstimmungswinkel innerhalb der Impulsbreite von 3 % ist dann 14° . Soll der Resonator in einer Zeit von 1 ms auf besser als 5° synchronisiert werden (für eine Beschleunigungszeit von 1 ms ausreichend) so ist eine Vormagnetisierungszeitkonstante $T_b = L_b/R_b = 0,3$ ms erforderlich.

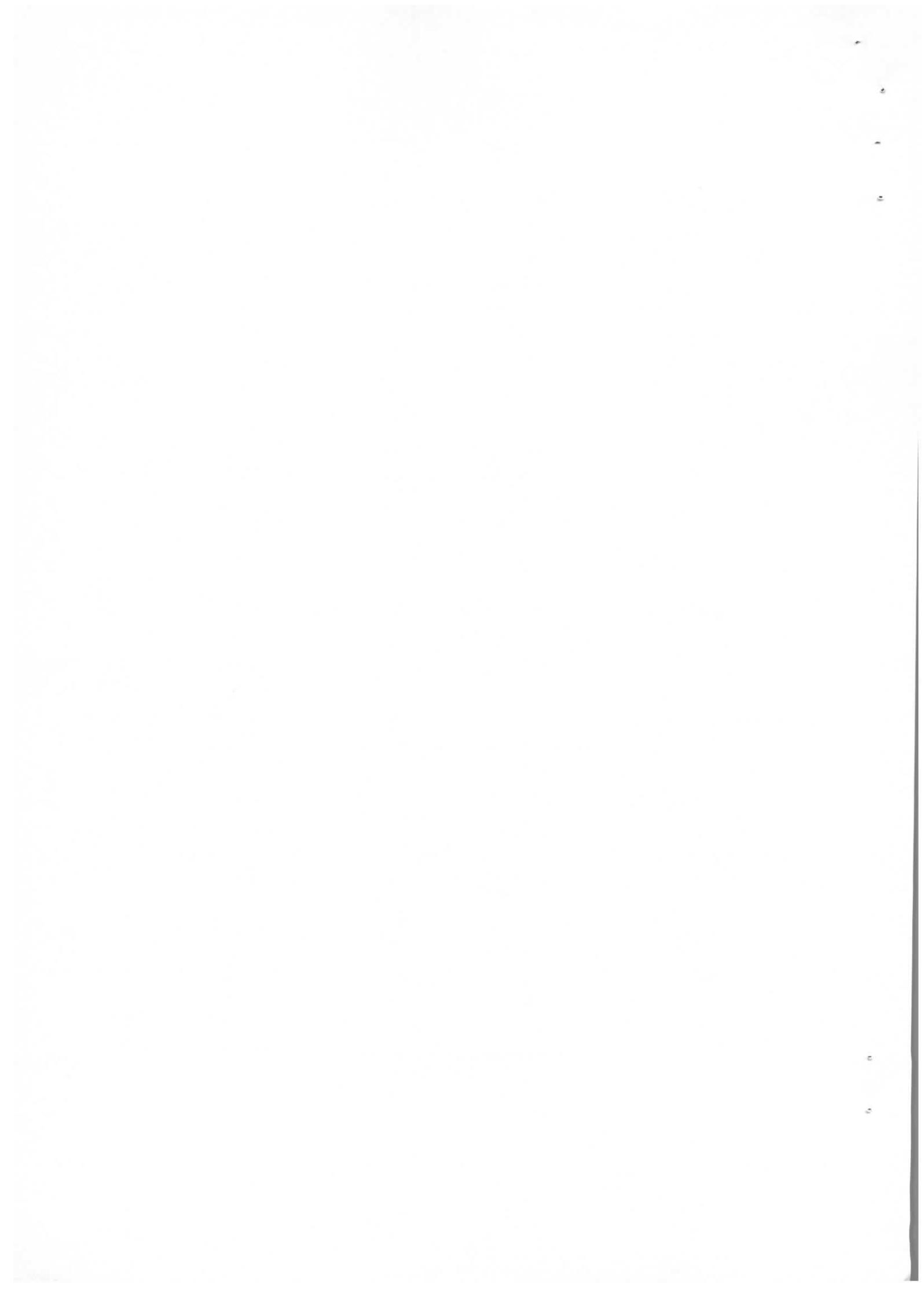
Für eine Permeabilitätsänderung von 2,5 % ist maximal eine Vormagnetisierungsfeldstärke von $H_v = 0,5$ AW/cm erforderlich (Abb. 2). Bei einer magnetischen Länge der Ferritkerne von $l_{Fe} = 75$ cm und einem maximalen Strom in der kleinen Vormagnetisierungswicklung von $J_p = 0,5$ A ergibt sich eine Windungszahl von $w_b = H \cdot l_{Fe}/J_b = 0,5 \cdot 75/0,5 = 75$ Wdg. Mit einem Kernquerschnitt von $F_{Fe} = 40$ cm² ist die Vormagnetisierungsinduktivität der kleinen Wicklung dann maximal

$$L_b = \mu \cdot \mu_r \frac{F_{Fe}}{l_{Fe}} w^2 = 1,25 \cdot 10^{-8} \cdot 150 \frac{40}{75} \cdot 75^2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Wird ein transistorgesteuertes Netzgerät mit einer Spannung von 24 V verwendet, so ist der Begrenzungswiderstand $R_b = U/J_{\max} = 24/0,5 = 48 \Omega$. Die Einstellzeitkonstante ist dann mit $T_b = L_p/A_p = 6 \cdot 10^{-3}/48 = 120 \mu\text{s}$ und die Verlustleistung 24 W.

Für die grobe Einstellung der Arbeitsfrequenz ist eine Vormagnetisierungsfeldstärke von ca. 9 AW/cm erforderlich. Ein Nachteil dieser Anordnung besteht darin, daß sich die Schwingkreisinduktivität im Frequenzbereich von 7,2 MHz bis 10,2 MHz um ca. 50 % ändert. Damit wird die Impedanz des Resonators bei höheren Energien von ca. 25 % reduziert. Die erforderliche Hochfrequenzleistung steigt damit bei hohen Energien um ca. 25 % an.

Bei den Voruntersuchungen zur Entwicklung des Protonen-HF-Systems soll entschieden werden, welche der beiden Möglichkeiten den geringsten Aufwand erfordert und reduziert werden soll.



IV. Konstruktiver Aufbau

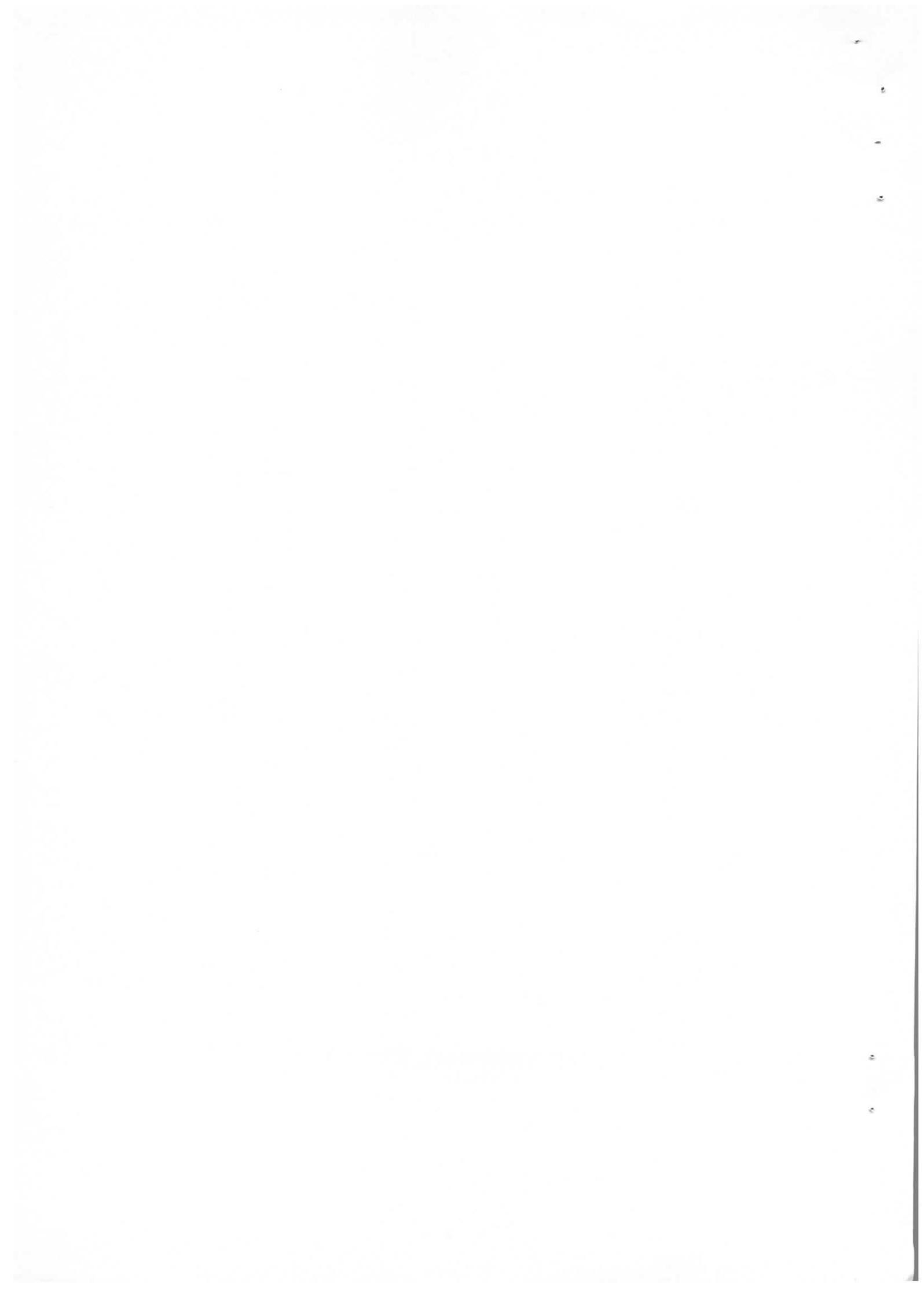
Der prinzipielle konstruktive Aufbau des Resonators ist in Abb. 4 dargestellt. In einem horizontal geteilten Gehäuse sind die mit den Wicklungen versehenen Ferritringe isoliert aufgebaut. Eine kurze Vakuumkammer mit Keramikgap wird achsial hindurchgeschoben und der obere Teil des Gehäuses, der mit Kontaktstreifen versehen ist, wird mit dem unteren Teil verschraubt. Am unteren Teil des Gehäuses befindet sich ein Kasten, in dem der Verstärker und evtl. die umschaltbaren Schwingkreiskapazitäten installiert sind. Über isolierte Durchführungen sind die Enden der Wicklungen mit diesen Komponenten verbunden.

Die Abmessungen des Protonen-Resonators entsprechen ungefähr denen der Elektronen-Cavities.

V. Das Hochfrequenzsystem

Beim Speichern von Protonen mit "HF-Stacking" muß sowohl die Frequenz als auch die Amplitude des Resonators schnell geändert werden ⁽¹⁾. In Abb. 5 ist die prinzipielle Anordnung zum Steuern von Frequenz und Amplitude dargestellt. Die Ferritkerne sind mit 3 Wicklungen versehen. Die Wicklung w_2 stellt die Induktivität des Schwingkreises dar, die Wicklung w_1 die Vormagnetisierungswicklung. Mit der Wicklung w_M wird die Amplitude und Phase der Resonatorspannung gemessen. Die Ansteuerhochfrequenz f_{HF} wird über einen Vorverstärker mit steuerbarem Verstärkungsfaktor dem Gegentaktverstärker zugeführt. Die Spannung der Meßwicklung wird mit dem jeweiligen vorgegebenen Amplitudenwert (u_{soll}) verglichen. Mit der Differenz wird der Verstärkungsfaktor des Vorverstärkers, der eine Bandbreite von 5 MHz haben soll, geregelt. Der Dynamikbereich muß ca. 30 db betragen.

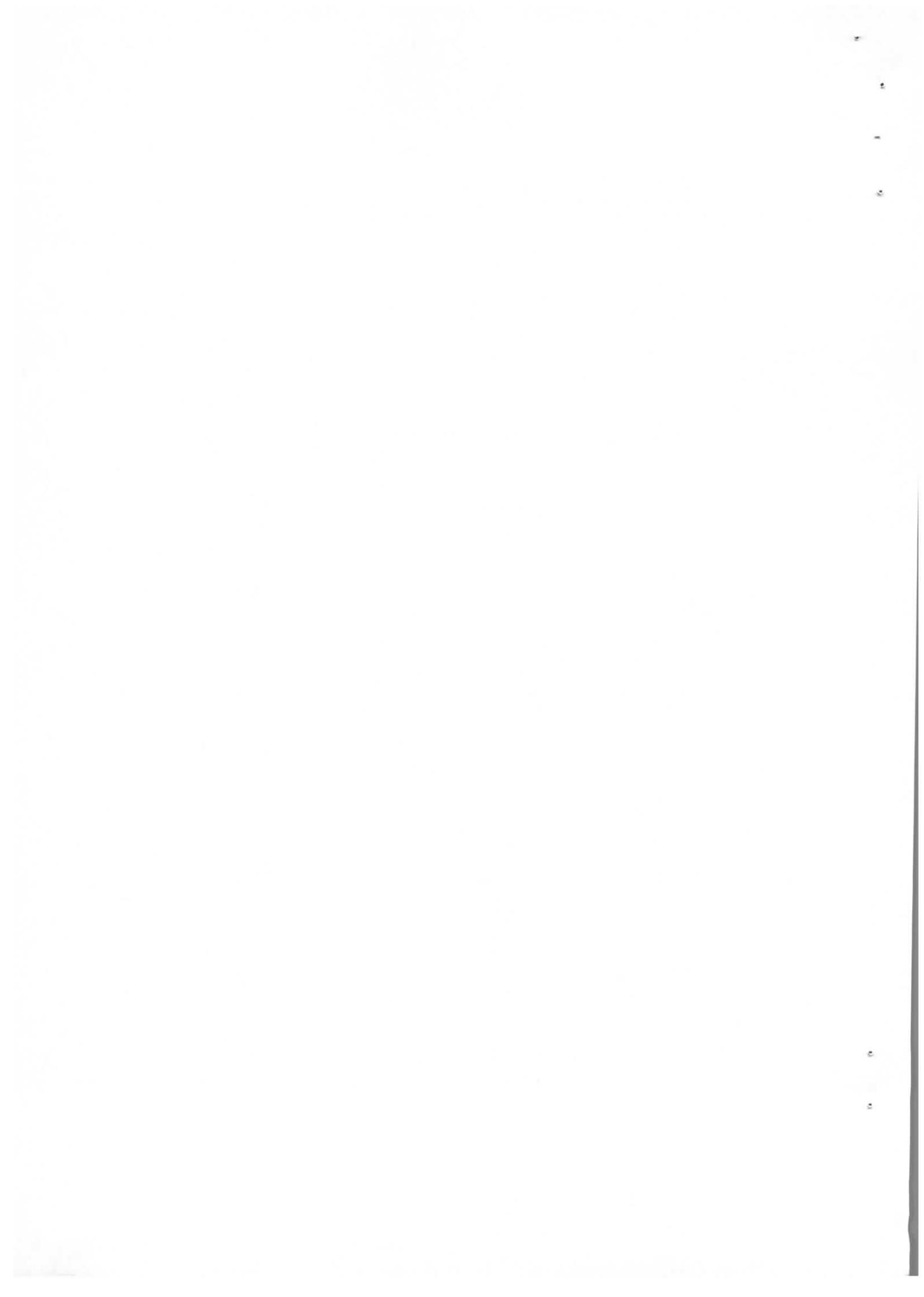
Zur Frequenzabstimmung des Resonators wird die Phase zwischen dem Signal der Meßwicklung (w_M) und der Spannung vor dem steuerbaren Verstärker gemessen. Mit dem Phasendifferenzsignal an dem Phasendiskriminator wird das in Abschnitt III beschriebene Vormagnetisierungsnetzteil angesteuert. Phasenfehler im steuerbaren Verstärker und im Gegentaktverstärker werden durch entsprechende Verstimmung des Resonators kompensiert, so daß die Phasenlage der Spannung am Resonator



jeweils auf die Bunchlage des injizierten Bunches geregelt wird. Beide Verstärker dürfen daher keine große Phasendrehung im Aussteuerbereich hervorrufen, da sonst eine größere Verstimmung des Resonators und damit eine höhere Hochfrequenzleistung erforderlich wird.

Die Pole der Regelschleifen sind so zu legen, daß im System auch bei schnellen Regelvorgängen keine Instabilitäten auftreten.

Die Probleme, die beim Synchronisieren von Synchrotron und Speicherring auftreten, werden zu einem späteren Zeitpunkt behandelt.



L i t e r a t u r

- 1) Parameter für das Speichern von Protonen in DORIS
Interner Bericht DESY H/73-1
H. Gerke, R.D. Kohaupt, H. Wiedemann

- 2) The High Power Part of the RF-System for the CERN Intersecting-Storage-
Rings (ISR)
CERN-ISR-HF/70-34
F.A. Forger, W. Schnell

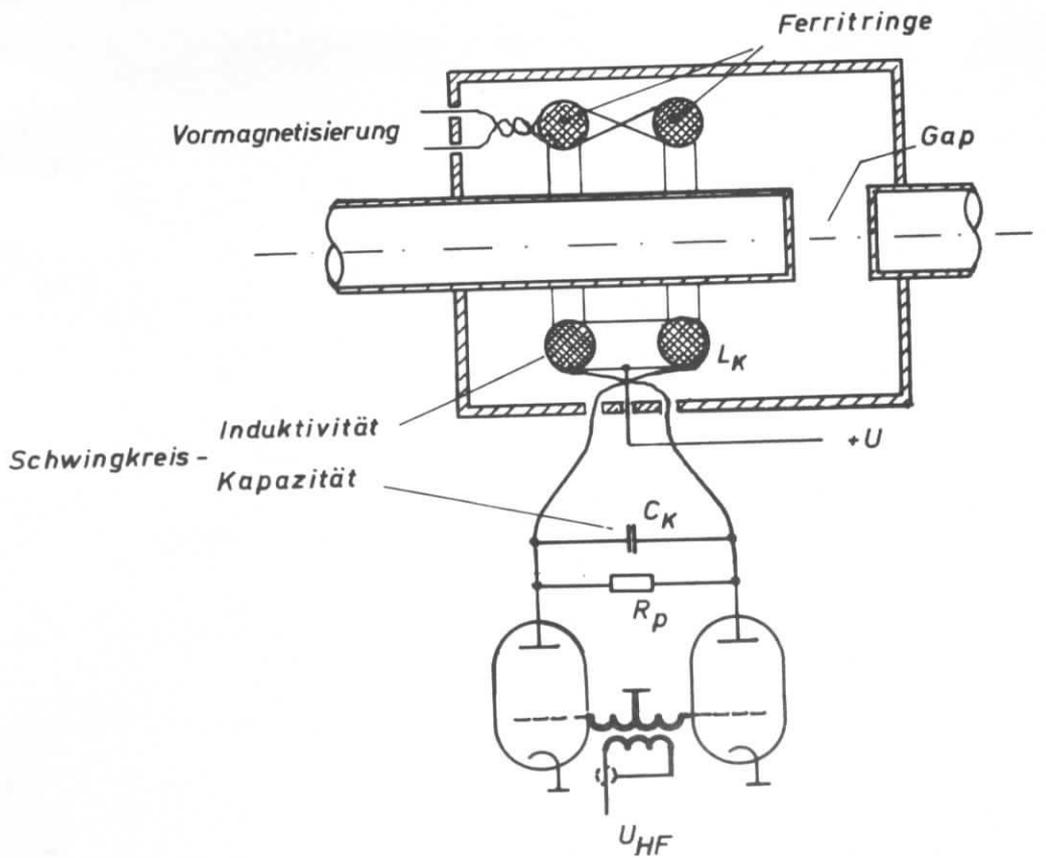


Abb. 1 Prinzipielle Anordnung eines Resonators mit räumlich getrennter Induktivität und Kapazität

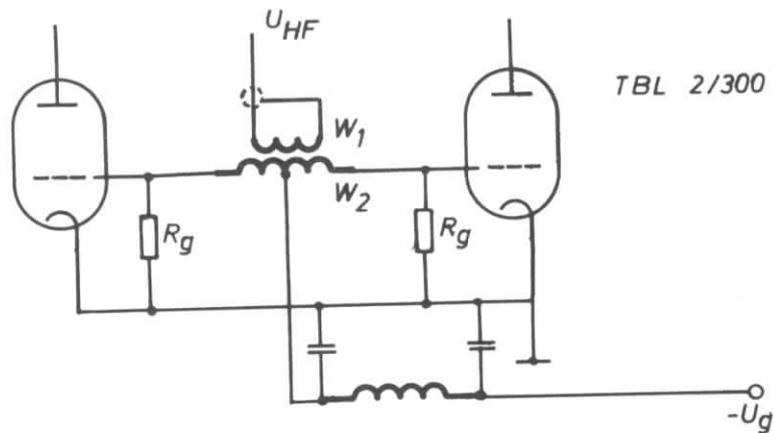


Abb. 3 Gegentaktaussteuerung der Verstärkerröhren

•
•
•
•

•
•

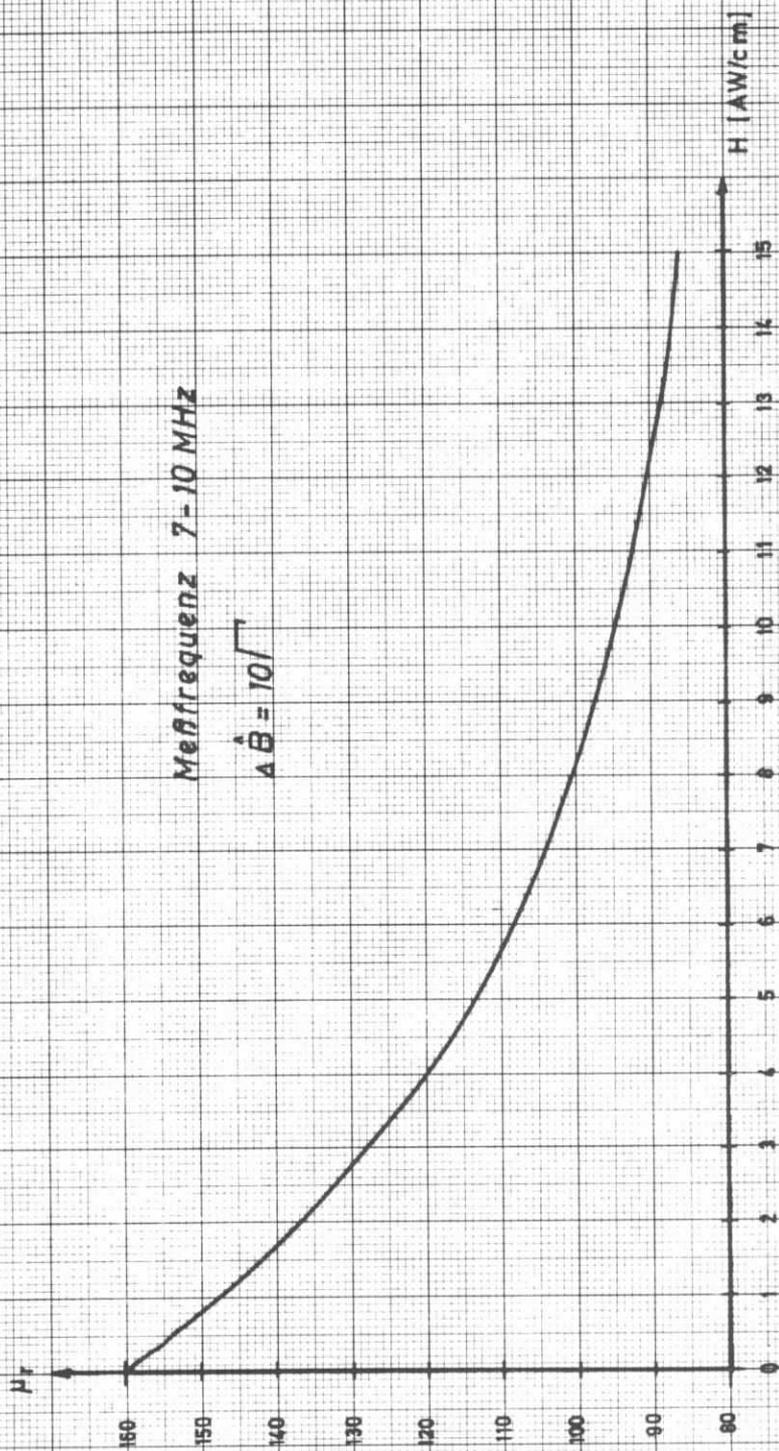
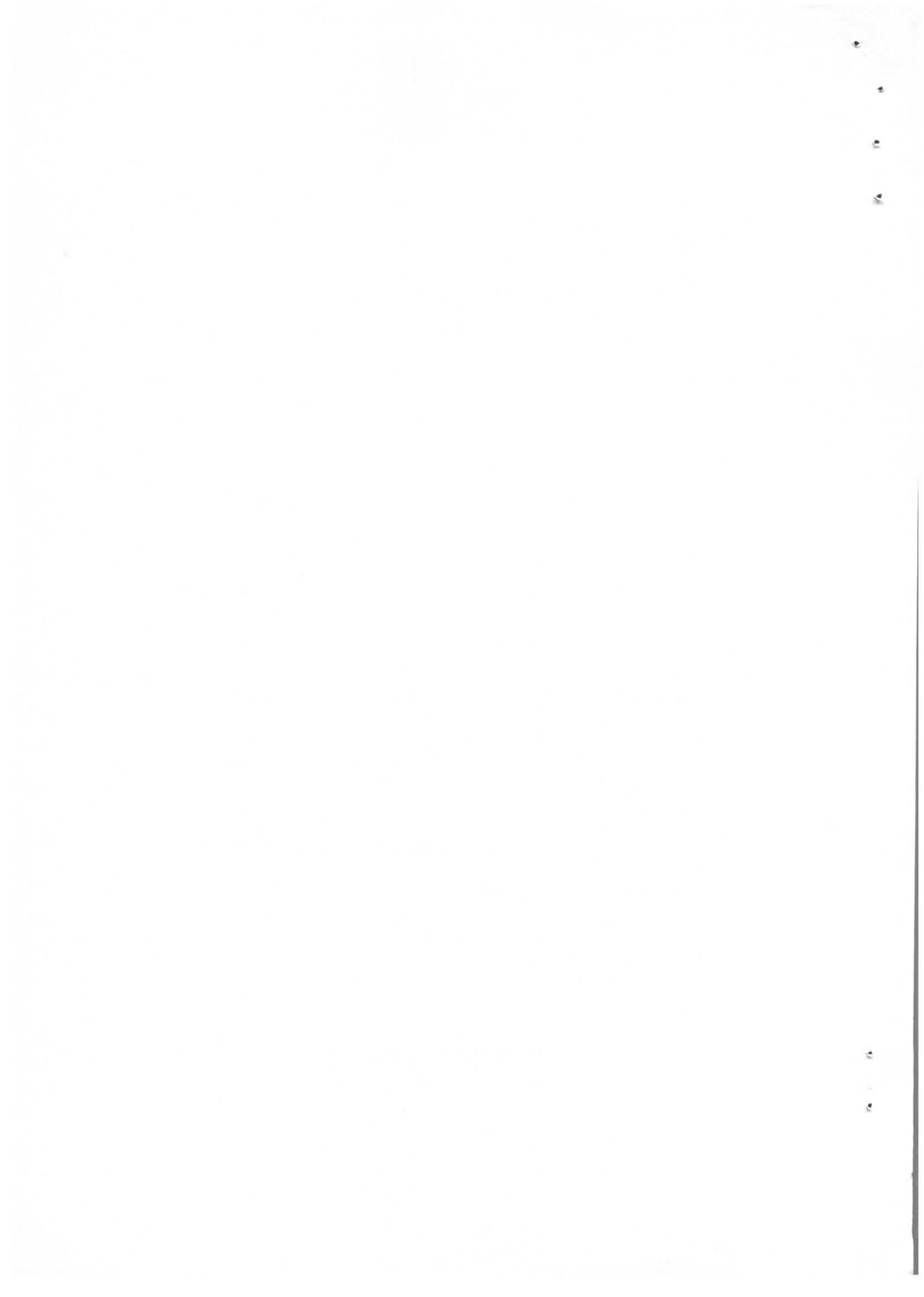


Abb. 2 Permeabilität von Ferroxcube 4C6 als Funktion der Vormagnetisierung H. —

H3/HA 17.9.73



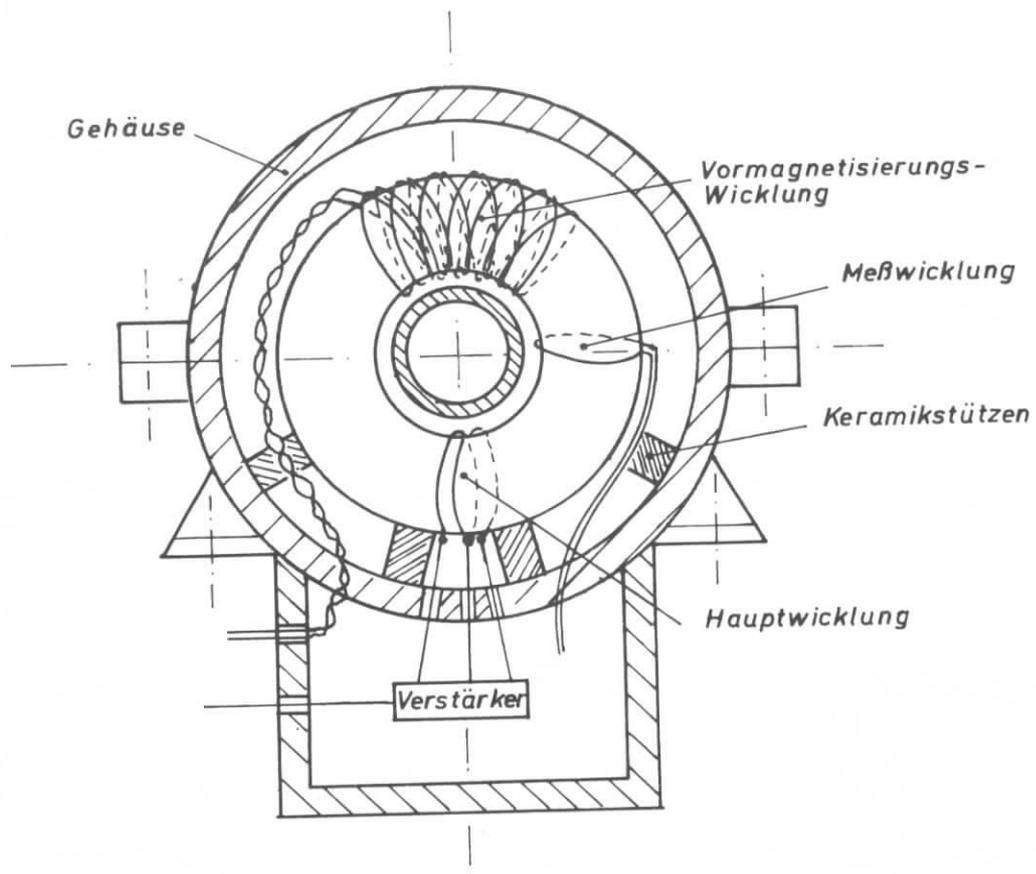
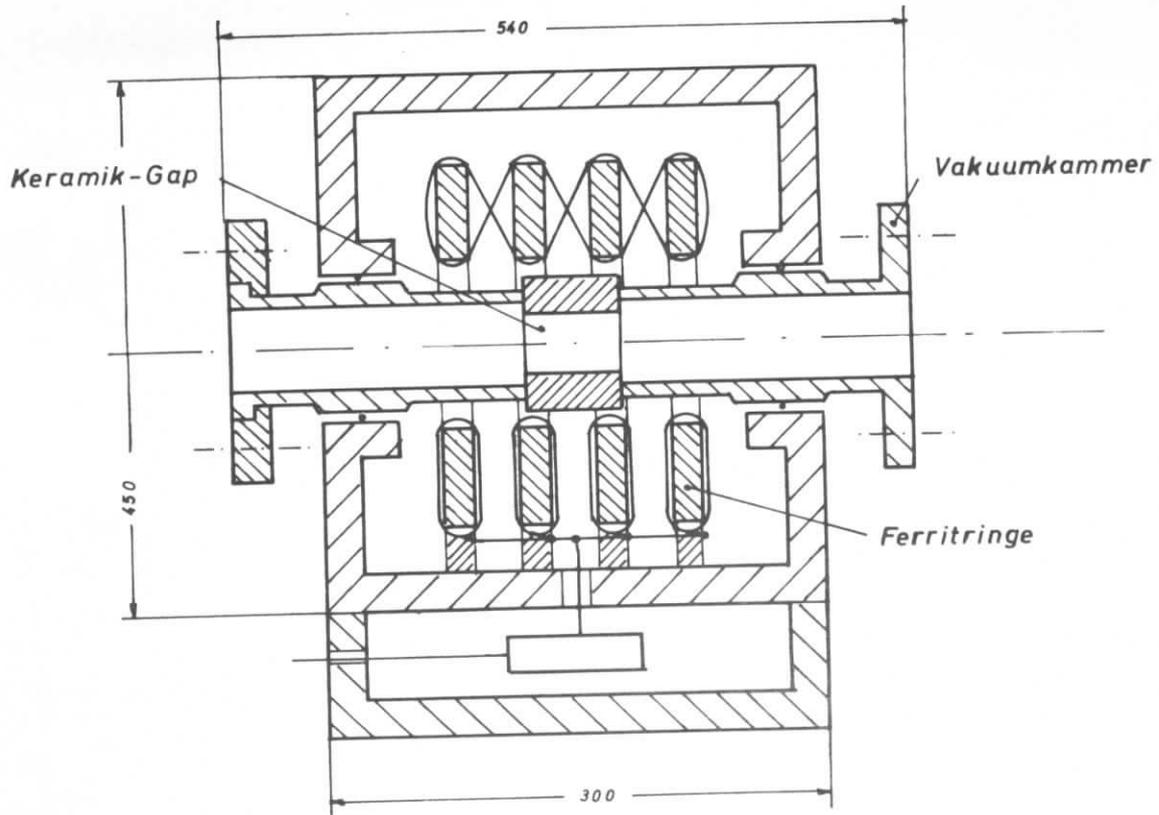


Abb. 4 Konstruktion und Aufbau des Resonators

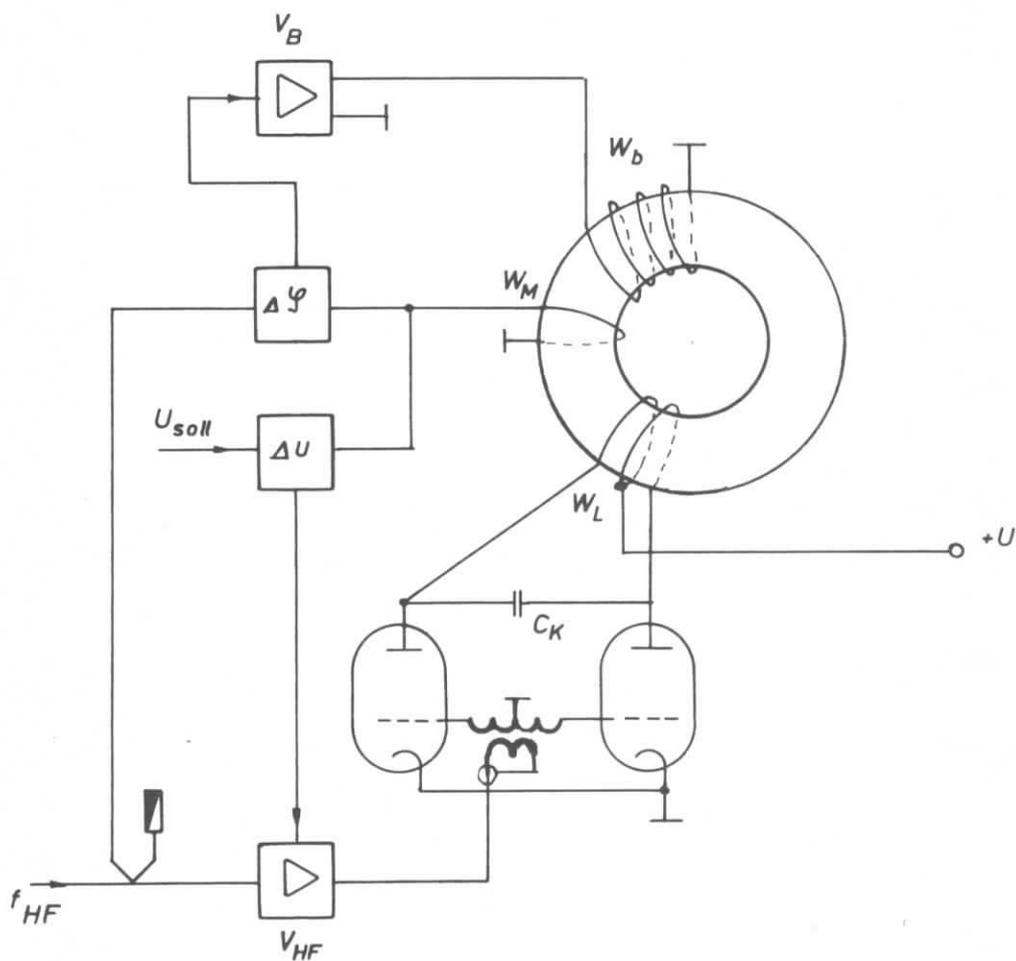


Abb. 5 Regelung der Hochfrequenzanordnung zum Speichern von Protonen im Doris

1
2
3
4

X

5
6