

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

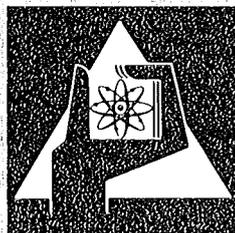
April 1975

KFK 2141

Institut für Experimentelle Kernphysik

**Studie zum Bau eines Nachbeschleunigers für  
mittelschwere Ionen mit supraleitenden Helixresonatoren**

H. Deitinghoff, H. Klein  
Institut für Angewandte Physik, Universität Frankfurt  
M. Kuntze, J.E. Vetter  
Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe  
E. Jaeschke, R. Repnow  
Max-Planck-Institut für Kernforschung, Heidelberg



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2141

Institut für Experimentelle Kernphysik

STUDIE ZUM BAU EINES NACHBESCHLEUNIGERS FÜR  
MITTELSCHWERE IONEN MIT SUPRALEITENDEN HELIXRESONATOREN

H. Deitinghoff, H. Klein, IAP, Universität Frankfurt  
M. Kuntze, J. E. Vetter, IEKP, Karlsruhe  
E. Jaeschke, R. Repnow, MPI, Heidelberg

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe



# Feasability Study of a Postaccelerator for Ions of medium Mass with superconducting helically loaded Resonators

## Abstract

Postaccelerators enlarging the capabilities of electrostatic preaccelerators are of growing interest. High energy gain per unit length, maximum flexibility to accelerate different kinds of ions and good beam quality are the specific features desired for heavy ion postaccelerators. These conditions can in principle be obtained using short superconducting rf-cavities. In this paper  $\lambda/2$  helically loaded resonators are proposed as accelerating elements. Design considerations are discussed and a tentative set of parameters is given for an accelerator capable of a final energy of 6 MeV/N up to mass 80. It is shown that the results at present obtained in superconducting test resonators enable the design of an accelerator which fulfils the conditions given above and offers the additional advantage of reduced power consumption compared to proposed normalconducting machines.

## Zusammenfassung

Nachbeschleuniger als Ergänzung für die in vielen Laboratorien verwendeten elektrostatischen Beschleuniger gewinnen zunehmend an Interesse. Die wichtigsten Forderungen, die an diese Nachbeschleuniger gestellt werden, sind: hoher Energiegewinn pro Länge, Flexibilität in bezug auf verschiedene Ionenarten und gute Strahlqualität. Supraleitende kurze Beschleunigungsstrecken sind grundsätzlich vorteilhaft für diese Anwendung. In diesem Bericht wird vorgeschlagen, eine Kette von  $\lambda/2$  langen Wendelresonatoren als Beschleunigungselemente zu verwenden. Am Beispiel eines Nachbeschleunigers, der in der Lage ist, Ionen bis zur Masse 80 auf 6 MeV/Nukleon zu beschleunigen, werden die wichtigsten Überlegungen diskutiert, die bei der Konzeption eines derartigen Beschleunigers zu beachten sind. Die Studie kommt zu dem Schluß, daß die erwähnten Forderungen erfüllbar sind und daß ein Beschleuniger mit supraleitenden Resonatoren den Vorteil geringeren Stromverbrauchs im Vergleich zu normalleitenden Maschinen bietet.

## I n h a l t

### Vorwort

1. Anforderungen an den geplanten Nachbeschleuniger
2. Parameterwahl für einen  $\lambda/2$ -Wendelresonator
  - 2.1 Spitzenfeldstärken
  - 2.2 Erreichbarer Energiegewinn und Frequenzwahl
3. Weitere Kriterien zur Parameterwahl
  - 3.1 Betriebstemperatur und Kühlprinzip
  - 3.2 Vergleich zwischen Kühlkapazität und zu erwartender thermischer Belastung
  - 3.3 Frequenzeinstellung
  - 3.4 Statische Frequenzverschiebung
  - 3.5 Störhub und Stellbereich
  - 3.6 Schnelles Frequenzstellglied
  - 3.7 Tieftemperaturverluste durch Hf-Leitungen
  - 3.8 Herstellbarkeit
4. Hochfrequenzschaltung
5. Teilchendynamik
  - 5.1 Radialbewegung
  - 5.2 Longitudinalbewegung
6. Gesamtkonzept eines supraleitenden Nachbeschleunigers
7. Bau- und Betriebskosten

### A n h ä n g e

- 1 Statische Frequenzverschiebung
- 2 Schnelle Frequenzstellglieder mit PIN-Dioden-Schaltern
- 3 Verluste in den Leitungen zwischen Resonator und Stellglied
- 4 Kühlmöglichkeiten, Begrenzung der abführbaren Wärmemengen

## Vorwort

Mitte 1973 hat eine Diskussionsgruppe von Mitarbeitern des Institutes für angewandte Physik (IAP) der Universität Frankfurt, des Institutes für experimentelle Kernphysik (IEKP), Karlsruhe, und des Max-Planck-Institutes für Kernphysik (MPI), Heidelberg, die Möglichkeiten diskutiert, die ein Nachbeschleuniger für schwere Ionen mit supraleitenden Resonatoren bietet. Der folgende Bericht faßt die Ergebnisse dieser Gespräche zusammen. Die Studie geht zwar von konkreten Randbedingungen aus, ohne die die hier vorgelegten Abschätzungen nicht möglich wären; es kann jedoch nicht Ziel dieser Zusammenfassung sein, einen Bauvorschlag zu liefern. Wie in einigen Kapiteln gezeigt wird, sind dazu noch wesentliche Voruntersuchungen nötig. Diese Versuche und die noch notwendigen Entwicklungsarbeiten werden in einem 1974 begonnenen Forschungsvorhaben als Zusammenarbeit des IEKP mit dem MPI durchgeführt. Im Jahr 1976 soll dann ein Bauvorschlag vorgelegt werden.

### 1. Anforderungen an den geplanten Nachbeschleuniger

Ausgangspunkt für die Überlegungen zum Bau eines Nachbeschleunigers für die Tandemmaschine im MPI Heidelberg war der Wunsch, Experimente mit mittelschweren Ionen auf Energien auszudehnen, die es erlauben, in der Nähe oder oberhalb der Coulombschwellen zu arbeiten. Eine erste Verbesserung dazu stellt die Erhöhung der Terminalspannung der Tandemmaschine auf bis zu 14 MV dar, die zur Zeit durchgeführt wird. Eine Nachbeschleunigungsstrecke nach einer weiteren Erhöhung des Ladungszustandes würde eine weitere erhebliche Ausweitung der experimentellen Möglichkeiten bedeuten.

Obgleich Experimentiervorschläge und die daraus sich ergebenden Anforderungen an die Nachbeschleunigung bereits in einem Bericht des MPI vom August 1972<sup>1</sup> zusammengestellt sind, haben die Autoren dieser Studie noch einmal durch eine Umfrage unter den möglichen Benutzern deren Vorstellungen über Endenergie und Ionenart ermittelt. Eine Zusammenfassung ist in Tab. 1 zu finden. Hier sind aus den von den Experimentatoren gewünschten Energien pro Nukleon und aus den im günstigsten Fall (höchster Ladungszustand, höchste Tandemspannung) erreichbaren Injektionsdaten (vgl.<sup>1</sup>) die Mindestanforderungen für die Nachbeschleunigung in Form der durchfallenen Spannung angegeben. Wie man

sieht, ist der größte Teil der Vorstellungen mit einer durchfallenden Spannung von 13 MV im Einklang. Für diese Studie ist daher ein Wert von 13 MV ( $\hat{=}$  6 MeV/N) für Br<sub>79</sub> zugrundegelegt worden. Eine genauere Festlegung ist im Sinne dieses Berichtes nicht nötig, da sie die grundsätzliche Konzeption des Nachbeschleunigers wenig verändern würde.

Aus dem weiten Massenbereich der gewünschten Ionen ergibt sich die Forderung nach einer flexiblen Beschleunigungsstruktur. Diese Flexibilität kann nur durch kurze, in ihrer Phase unabhängig voneinander einstellbare Resonatoren erreicht werden. Da IEKP und IAP über umfangreiche Erfahrungen in Berechnung, Bau und Betrieb von Helixresonatoren verfügen, lag es nahe, supraleitende  $\lambda/2$  Helixresonatoren zu verwenden.

Tab. 1: Anforderungen an die Endenergie des Nachbeschleunigers und daraus resultierende durchfallene Spannung. Terminalspannung 12 MV, Stripper: Gas - Folie (1)

Massen Zahl	Endenergie		Injektion		notwendiger Energiege- winn MeV	durchfallene Spannung MV
	MeV/N	MeV	Ladungs- Zahl	Energie MeV		
12	10..12	120..144	6	84	36... 48	6... 8
60	5.. 6	300..360	20	108	192.. 252	9,6..12,6
80	6	475	23	108	367	16
			26	* 140	335	12,9
100	5	500	26	96	404	15,5
			28	* 140	360	13
120	4...6	480..720	26	96	384.. 624	14,8..24

\* Terminalspannung 14 MV, 10% der Intensität

## 2. Parameterwahl für einen $\lambda/2$ -Wendelresonator

### 2.1 Spitzenfeldstärken

Im Rahmen des Forschungsvorhabens supraleitender Protonenbeschleuniger wurden im IEKP bereits Messungen an  $\lambda/2$ -Helixresonatoren durchgeführt. Die Geometrie dieser Wendelresonatoren (Abb. 1) war für niedrige Protonengeschwindigkeiten ausgelegt ( $\beta \approx 0,06$ ) und ist damit auch für Schwerionenbeschleuniger recht typisch. Die mit die-

sen Resonatoren gesammelten Erfahrungen können daher direkt für diese Studie verwendet werden.

Die Versuchsergebnisse können etwa wie folgt zusammengefaßt werden: Supraleitende  $\lambda/2$  Helixresonatoren aus Niobmaterial erlauben beschleunigende Felder von bis zu 3 MV/m (laufende Wellenkomponente) bei einer Frequenz um 100 MHz. Die Beschleunigungsfeldstärke kann durch 3 Effekte begrenzt werden:

#### 2.1.1 Thermomagnetische Begrenzung

Die am Helixrohr auftretende maximale magnetische Oberflächenfeldstärke darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten, um "thermomagnetische" Zusammenbrüche zu vermeiden. Hierunter versteht man eine durch lokal über das kritische Feld des Supraleiters überhöhte Magnetfelder verursachte thermische Instabilität in einem mikroskopisch kleinen Gebiet, das durch Übergang zur Normalleitung große Verluste ergibt. Obgleich bereits bis zu 1200  $\Gamma$  Oberflächenfeldstärken ohne diesen Effekt erreicht werden konnten (6 mm Rohr), liegt die Mehrzahl der Versuchsergebnisse zwischen 800 und 600  $\Gamma$  (8 mm Rohrdurchmesser). Als maximale Oberflächenfeldstärke wurden deshalb zunächst 600  $\Gamma$  als Grenze eingesetzt.

#### 2.1.2 Thermoelektrische Begrenzung

Thermische Überlastung der Heliumkühlung im Niobrohr kann durch auftretende Elektronen, ausgelöst durch Feldemission, hervorgerufen werden. Begrenzend ist in diesem Fall das maximale elektrische Feld am Wendelrohr, insbesondere die Feldkomponente in Achsenrichtung ( $E_z$ ), da hierdurch Elektronen auf das Helixrohr konzentriert werden. Einsatz der Feldemission wurde zwischen 15 und 24 MV/m beobachtet. Bei Oberflächenfeldern bis zu 16 MV/m ist aber mit einem Einfluß auf das Zusammenbruchsverhalten nicht zu rechnen, dieser Wert wird z. Zt. als elektrische Grenzfeldstärke eingesetzt.

### 2.1.3 Thermischer Zusammenbruch

Thermischer Zusammenbruch tritt auf bei einem zu hohen Oberflächenwiderstand Reinheit des Supraleitermaterials, Beschaffenheit der Oberflächenschicht, eingefrorene Magnetfelder und Verunreinigung durch kondensierte Gase während der Abkühlung bestimmen, welcher Oberflächenwiderstand (bzw. welche Güte) erreicht werden kann.

Unter "thermischem Zusammenbruch" versteht man eine Erhöhung der Stromwärmeverluste in einem makroskopischen Gebiet des Resonators über einen Wert hinaus, der durch das Wärmeleitvermögen des Kühlmittels gegeben ist. Im Anhang 5 wird auf die Kühlkapazität näher eingegangen. In typischen Helixresonatoren mit 8 x 1 mm Rohrdurchmesser sind Verluste von etwa 1 Watt bei Kühlung mit ruhendem superfluidem Helium tolerierbar. Hieraus resultiert eine notwendige Resonatorgüte von der Größenordnung  $10^8$ .

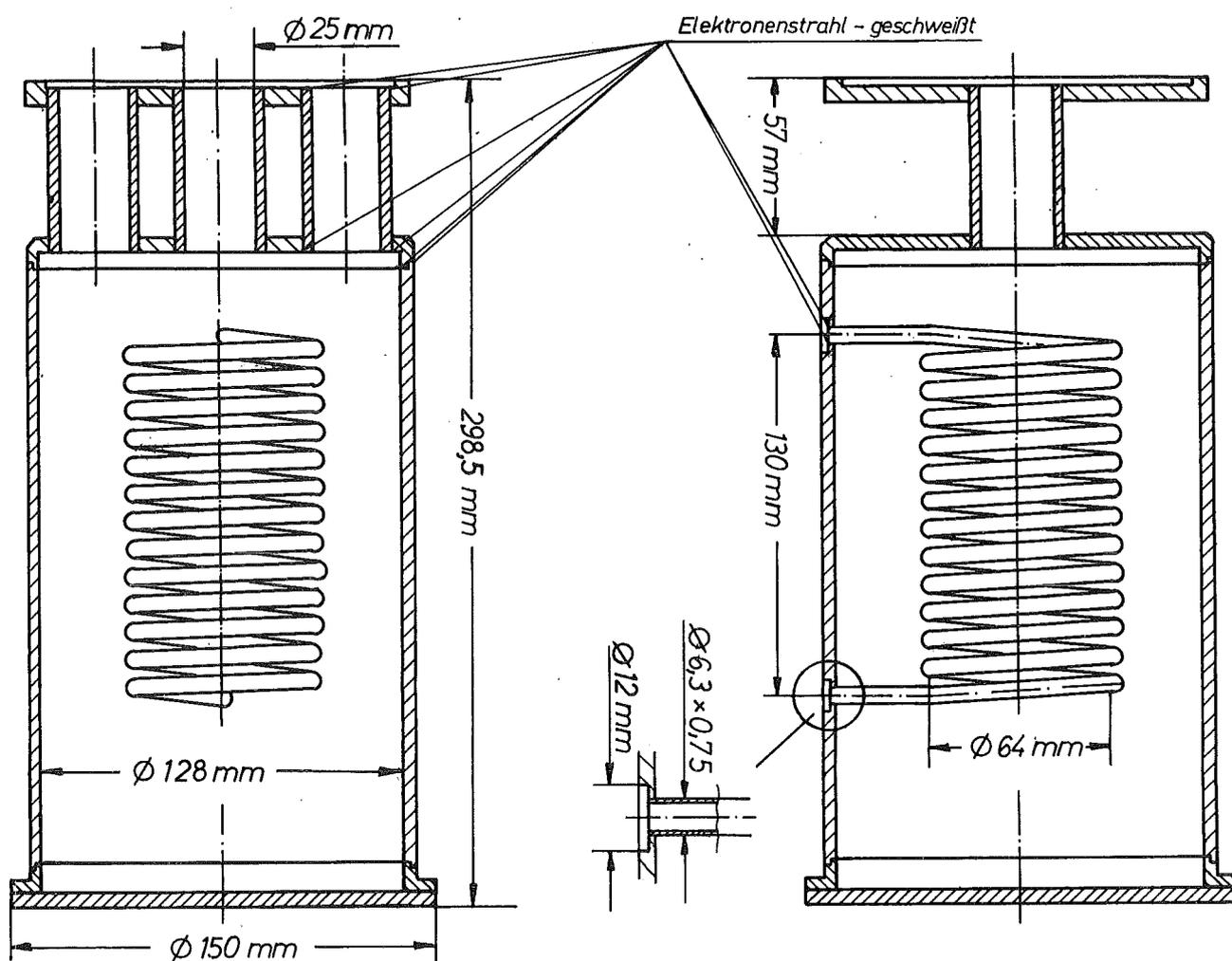


Abb. 1: Versuchsresonator aus Nb-Material

$E_{0,TW,axis}$   
[MeV/m]

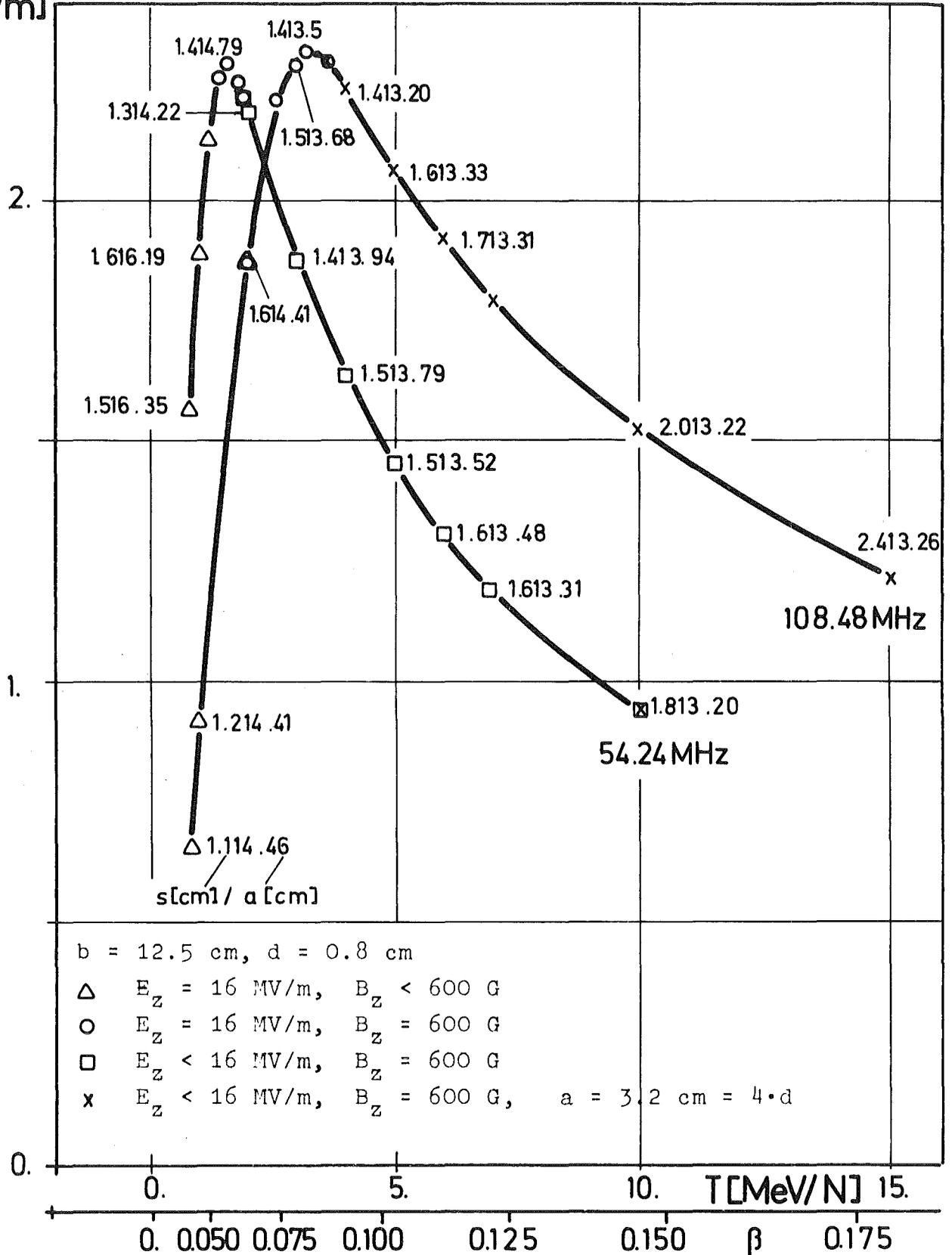


Abb. 2: Erreichbare Achsenfeldstärke als Funktion der Phasengeschwindigkeit für einen supraleitenden  $\lambda/2$  Wendelresonator, durch Spitzenfelder von  $E_z = 16$  MV/m und  $B_z = 600$  G begrenzt.  
 $a$  = Wendelradius,  $s$  = Steigung,  $b$  = Außenzylinderradius,  $d$  = Rohraußendurchmesser

## 2.2 Erreichbarer Energiegewinn und Frequenzwahl

Aus den experimentellen Erfahrungen ist abzuleiten, daß ein Helixresonator für die Beschleunigung von mittelschweren Ionen so entworfen werden sollte, daß die oben angegebenen Spitzenfeldstärken nicht überschritten werden<sup>2</sup>. In Abb. 2 ist die unter diesen Bedingungen erreichbare beschleunigende Feldstärke als Funktion der Phasengeschwindigkeit bzw. der spezifischen Energie aufgetragen. Die Frequenz wurde zwischen 54 und 108 MHz variiert in ganzzahligen Vielfachen des bereits im Bau befindlichen Pulsungssystems<sup>3</sup>. Die Maximalwerte des Beschleunigungsfeldes sind im angenommenen Frequenzbereich etwa gleich groß (2,3 MV/m), die Optimalgeschwindigkeit ist aber frequenzabhängig in der Weise, daß sich Resonatoren höherer Frequenz besser zur Beschleunigung bei höheren spezifischen Energien eignen. Die in Abb. 2 dargestellten Rechenergebnisse gelten zunächst für lange Wendeln, für kurze Helices werden diese Werte durch Randfeldeffekte modifiziert<sup>4</sup>.

Tab. 2: Geometrie und Maximalfeldstärken optimierter  $\lambda/2$ -Helixresonatoren

	54 MHz	108 MHz
Außenzylinderradius	10 ... 12,5 cm	7,5 .. 12,5 cm
Wendelradius	4,2 cm	3,7 cm
Wendelsteigung	1,3 cm	1,5 cm
Rohrdurchmesser	0,8 cm	0,8 cm
el. Länge (Schichtmodell)	18,2 cm	10,9 cm
korrigierte Länge	20,7 cm	12,7 cm
max. Achsenfeld, lfd. Welle	2,35 MV/m	2,4 MV/m
Feldüberhöhung $E_{Zmax}/E_0$	6,8	6,8
Feldüberhöhung $B_{Zmax}/E_0$	253 $\Gamma$ /MV/m	251 $\Gamma$ /MV/m

Die Geometrie von zwei Resonatoren mit optimalem Energiegewinn für die Frequenzen 108 bzw. 54 MHz ist in Tabelle 2 angegeben. Im folgenden werden diese Resonatoren den Abschätzungen zugrundegelegt und kurz als "108 MHz-Resonator" oder "54 MHz-Resonator" bezeichnet.

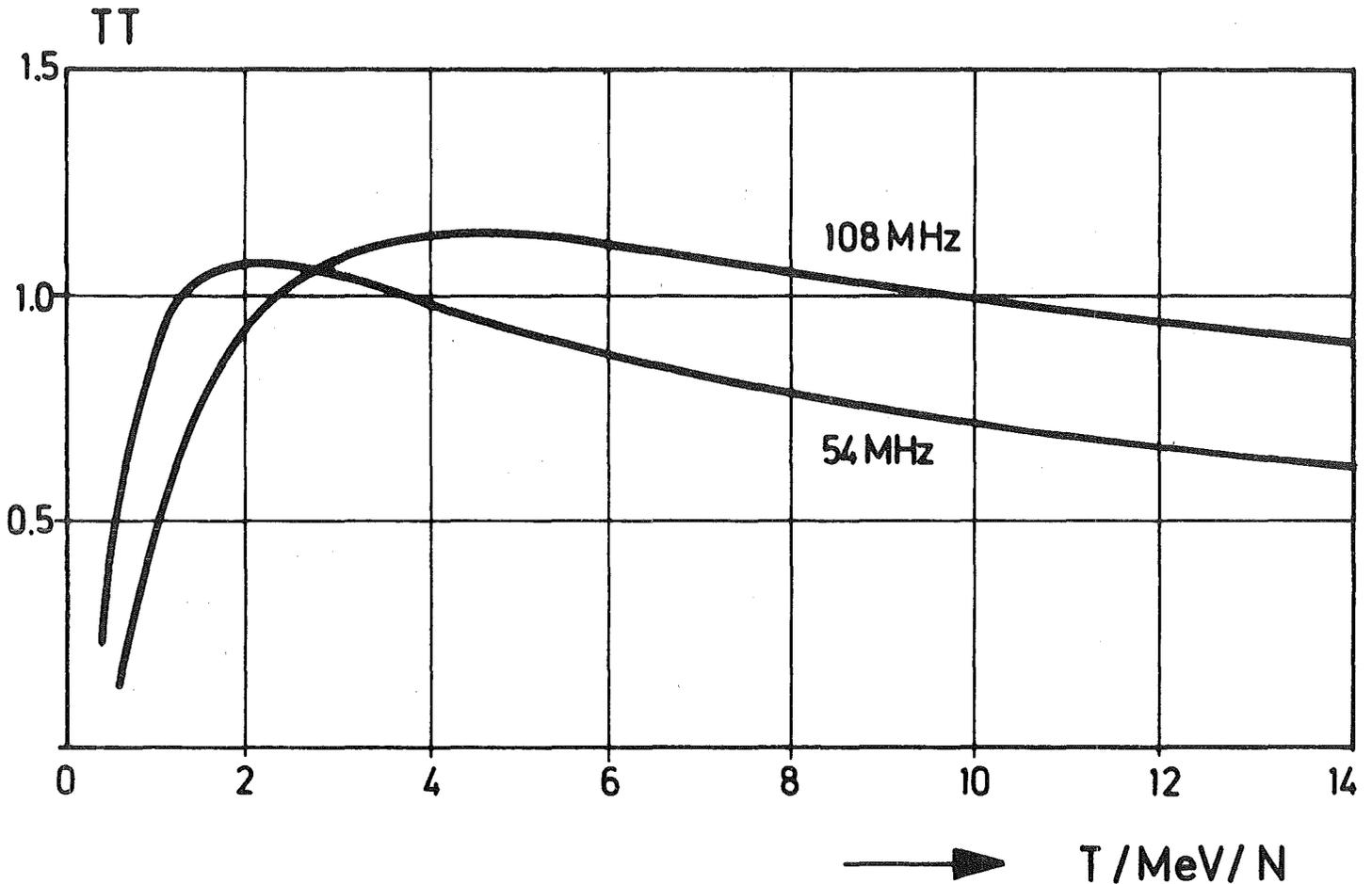


Abb. 3: Transsittime-Faktor als Funktion der Energie pro Nukleon

Ionen, deren Geschwindigkeit von der Optimalgeschwindigkeit abweicht, erfahren eine um den Transsittimefaktor  $TT$  geringeren Energiegewinn.  $TT$  ist damit ein Maß für die Flexibilität der Resonatoren in ihrer Eigenschaft, Ionen verschiedener Massen zu beschleunigen. In den hier angegebenen  $TT$ -Faktoren (Abb. 3) sind die Randfeldeffekte berücksichtigt, so daß die für eine Ionenart wirksame beschleunigende Feldstärke eines Resonators das Produkt der in Abb. 2 dargestellten Achsenfeldstärke und des  $TT$ -Faktors nach Abb. 3 ist. Aus vorgegebener Endenergie (hier 6 MeV/N für  $Br_{79}$ ) kann nun die Anzahl der notwendigen Resonatoren bestimmt werden. Bei 54 MHz sind 34 Resonatoren erforderlich, bei 108 dagegen 44. Die erreichbaren Endenergien für verschiedene Ionenarten für einen 54 und einen 108 MHz Nachbeschleuniger sind in Tab. 3 enthalten.

Die Flexibilität bezüglich der Ionenmasse ist bei beiden Frequenzen groß und nur wenig unterschiedlich. Die Anzahl der Resonatoren ist bei 108 MHz zwar um 30% höher, die unterschiedlichen Längen der Resonatoren führen aber zur gleichen Gesamtlänge des Nachbeschleuni-

gers. Aus diesem Ergebnis läßt sich noch keine eindeutige Entscheidung treffen, welcher Frequenz der Vorzug zu geben ist.

Tab. 3: Endenergie für verschiedene Ionenarten nach einer Nachbeschleunigung mit einer Kette Helixresonatoren

a.) für  $f = 54$  MHz; 34 Resonatoren mit einer el. Länge von je 20,7cm

Ion	Injektionswerte			Ausgang Nachbeschleuniger	
	Ladung	Anfangsenergie pro Nukleon MeV/N	Anfangsenergie MeV	Endenergie pro Nukleon MeV/N	Endenergie MeV
C <sub>12</sub>	6	7	84	11,9	143
O <sub>16</sub>	8	6,75	108	11,7	188
S <sub>32</sub>	15	3	96	8,54	273
Fe <sub>56</sub>	19	1,93	108	6,32	354
Br <sub>79</sub>	23	1,37	108	5,29	418
Br <sub>79</sub>	26	* 1,77	140	6,08	480
Ag <sub>107</sub>	26	0,9	96	4,22	451

\* bei 10% der maximalen Intensität und 14 MV Terminalspannung

b.) für  $f = 108$  MHz; 44 Resonatoren mit einer el. Länge von je 13,5 cm

Ion	Injektionswerte			Ausgang Nachbeschleuniger	
	Ladung	Anfangsenergie pro Nukleon MeV/N	Anfangsenergie MeV	Endenergie pro Nukleon MeV/N	Endenergie MeV
C <sub>12</sub>	6	7	84	13,1	157
O <sub>16</sub>	8	6,75	108	12,8	204
S <sub>32</sub>	15	3	96	9,15	293
Fe <sub>56</sub>	19	1,93	108	6,36	356
Br <sub>79</sub>	23	1,37	108	4,9	390
Br <sub>79</sub>	26	* 1,77	140	6,0	474
Ag <sub>107</sub>	26	0,9	96	3,29	352

\* bei 10% der maximalen Intensität und 14 MV Terminalspannung

### 3. Weitere Kriterien zur Parameterwahl

Die Optimierung der Wendelresonatoren wurde zunächst nur im Hinblick auf Spitzenfeldstärken durchgeführt. Im folgenden soll geprüft werden, ob weitere wichtige Kriterien für supraleitende Wendelresonatoren mit der gefundenen Optimierung im Einklang sind. Diese sind insbesondere Kühlungsbegrenzungen, Kühlaufwand, Einstellbarkeit der Betriebsfrequenz, Einfluß von Störungen auf die Eigenfrequenz der Resonatoren und Herstellbarkeit.

#### 3.1 Betriebstemperatur und Kühlprinzip

Die Betriebstemperatur supraleitender Resonatoren muß genügend tief unterhalb der Sprungtemperatur des Supraleiters (Nb : 9.2 K) liegen. Um geringe Verluste zu haben, soll der Resonator im Restwiderstandsbereich betrieben werden, in dem die bei höheren Temperaturen exponentielle Abhängigkeit von der Temperatur in eine schwache Temperaturabhängigkeit übergeht. Nach Messungen im IEKP ist dieser Restwiderstand für  $T \leq 4.2$  K in Helixresonatoren annähernd erreicht. Auch die in 2.1 erklärten feldbegrenzenden Effekte sind für  $T \leq T_c/2$  nicht (Feldemission) oder nur wenig (thermomagnetischer Effekt) von der Temperatur abhängig. Grundsätzlich ist daher jede Kühlungsart anwendbar, die eine Temperatur von  $\leq 4.2$  K am Supraleiter erzeugt.

Bei Diskussion der verschiedenen Kühlmöglichkeiten (Anhang 4) ergab sich, daß Kühlung mit superfluidem Helium bei ca. 1.8 K, unterstützt durch Superfilter, die derzeit günstigste Kühlmöglichkeit für supraleitende Helixresonatoren darstellt (bis zu 5 W/Resonator).

#### 3.2 Vergleiche zwischen Kühlkapazität und zu erwartender thermischer Belastung

Die Stromwärmeverluste in supraleitenden Resonatoren bei hohen Feldern sind in starkem Umfang von Vorbehandlung, Kontamination durch kondensierte Gase und in geringerem Umfang von Temperatur und Frequenz abhängig. Versuche an einem dem 108 MHz Resonator sehr ähnlichen Modellresonator haben bei Zusammenbruchfeldstärken

von  $B_{\max} \geq 580$  T Verluste ergeben, die höchstens 0.5 Watt betragen. Eine mittlere Kühlleistung von 1 Watt pro Resonator scheint daher ausreichend zu sein. Darüberhinaus ist eine große Reserve in der Kühlkapazität des einzelnen Resonators von Vorteil. Sie wird durch Superfilter erreicht (Anhang 4). Sollte sich nämlich die Betriebsgüte eines einzelnen Resonators durch eine Störung verschlechtern, ist es durch die hohe Kühlungsreserve möglich, die Beschleunigungsstrecke weiter zu betreiben. Wie in den folgenden Ausführungen deutlich wird, ist der Wärmeanfall in den supraleitenden Resonatoren nur ein Teil der gesamten Heliumverluste, weitere Anteile werden durch Isolations- und Aufhängungsverluste hervorgerufen sowie durch die weiter unten beschriebenen Verluste auf den Hochfrequenzleitungen (Abschnitt 3.7).

### 3.3 Statische Frequenzverschiebung

Die hohe elektrische Feldstärke im Resonator läßt nicht zu, daß der Wendelleiter abgestützt wird. Die freitragend ausgeführte Wendel ist aber besonders empfindlich gegen auf sie einwirkende Kräfte und reagiert darauf durch Änderungen der Eigenfrequenz. Eine Ursache der Eigenfrequenzänderung sind die elektromagnetischen Kräfte selbst: Der im Wendelleiter fließende Resonanzstrom bewirkt eine Kontraktion der Windungen und damit eine quadratische von der Feldstärke abhängige Frequenzerniedrigung (statische Frequenzverschiebung). Die Größe des Effekts ist über die Feldkonfiguration und die Biegesteife des Wendelrohrs von der Geometrie abhängig. Diese Abhängigkeit ist im Anhang 1 näher untersucht. Für die nach Kriterien der Spitzenfelder ausgewählten Resonatoren ergibt sich eine annähernd gleich große Frequenzänderung zwischen kleiner Resonatorfeldstärke und Maximalfeld. Sie beträgt -123 kHz für den 54 MHz-Resonator und -100 kHz für den 108 MHz-Resonator.

Der Betrieb eines Resonators mit einer derart ausgeprägten Kopplung von Amplitude und Frequenz ist nur durch ein Regelsystem möglich, wie es in Kap.4 beschrieben wird.

### 3.4 Frequenzeinstellung

Bei der Herstellung der Wendeln treten Toleranzen auf, die zu Fehlern in der Eigenfrequenz von bis zu einigen hundert kHz führen.

Durch Festlegung der Position der Wendelzuführungen nach einer Messung der Eigenfrequenz und durch Justieren der Windungsabstände nach dem Einschweißen kann der Fehler wesentlich reduziert werden. Nach unseren Erfahrungen ist mit einem Frequenzfehler unterhalb von 5 kHz zu rechnen. Obgleich es möglich ist, diese Abweichung durch eine Stellvorrichtung auszugleichen, scheint dieser Weg aufwendig zu sein. Es wird daher vorgeschlagen, die Resonatorfeldstärke über den Effekt der statischen Frequenzverschiebung zur Frequenzeinstellung zu benutzen. Wie in 3.3 ausgeführt wurde, beträgt die statische Frequenzverschiebung typisch ca. 100 kHz und ändert sich quadratisch mit der Feldamplitude. Ein Frequenzfehler von 5 kHz kann daher durch eine Feldänderung von ca. 2,5% kompensiert werden.

Wird die Frequenz in dieser Weise auf gleiche Werte bei Sollfeld eingestellt, dann fallen die Eigenfrequenzen bei kleineren Amplituden auseinander. Daher braucht man für jeden Resonator eine getrennte Erregung, mit der die Feldamplitude zunächst soweit aufgebaut wird, bis die Sollfrequenz erreicht ist. Erst dann wird phasenstarrer Betrieb gegenüber einer Referenzphase möglich.

### 3.5 Störhub und Stellbereich

Eine weitere Auswirkung der geringen Formstabilität der Wendeln ist die Empfindlichkeit gegenüber äußeren Störungen. Vibrationen, verursacht z.B. von Pumpen und Kompressoren, werden über die Aufhängungen und Zuleitungen auf die Resonatoren übertragen und regen die Wendeln zu Schwingungen im Frequenzbereich bis zu einigen hundert Hz an. Die dadurch verursachte Störung der Eigenfrequenz wird als Störhub bezeichnet. Der Störhub muß durch ein Frequenzstellglied ausgeglichen werden, dessen Stellgeschwindigkeit und Stellbereich passend gewählt werden müssen. Aus Unkenntnis der tatsächlichen Verhältnisse müssen wir in dieser Studie Abschätzungen machen, die sich an den folgenden Erfahrungen orientieren: In Argonne (USA) wird der Störhub einer 6 mm  $\lambda/2$ -Wendel bei Tieftemperatur (ohne Kälteanlage) mit 0,3 kHz<sub>pp</sub> angegeben. Helixsektionen für den Protonenbeschleuniger im IEKP, die mehrere gekoppelte Wendeln enthalten, zeigen dagegen Frequenzstörungen von typisch 3 kHz, die sich im Kaltbetrieb zeitweise noch erhöhen.

Im Laborkryostaten, ohne zusätzliche schwingungsabschirmende Maßnahmen, liegt der Störhub einer 8 mm  $\lambda/2$ -Wendel bei  $\leq 1$  kHz (IEKP).

Durch schwingungsdämpfende Aufstellung läßt sich die Anregung vom Boden zwar stark reduzieren, jedoch müssen gleichzeitig alle Zuführungen zum Kryostaten (Helium-, Hf-Leitungen, Strahlrohre etc.) schwingungsarm angeschlossen werden. Beim Bau des Kryostaten ist darauf zu achten, daß keine Resonanzüberhöhungen entstehen. Erschwerend für die Abschirmung der Vibrationen ist, daß bei Betrieb von Maschinen mit wechselnder Drehzahl frequenzveränderliche Linien im Störspektrum auftreten. Drehzahländerungen sind sowohl durch veränderliche Lasten als auch durch veränderliche Netzspannung üblich. Ein entscheidender Vorteil des hier vorgelegten Vorschlages, der davon ausgeht, identische Resonatoren zu verwenden, liegt darin, daß es grundsätzlich möglich ist, durch Geometrieänderung die Eigenfrequenzen der mechanischen Schwingungen der Helix zu verändern, um ausgeprägten Linien im Störspektrum auszuweichen. Diese Möglichkeit ist bei einer Vielzahl von verschiedenen Resonatoren nicht mehr praktikabel.

Wirksame Abschirmung der Vibrationen kann nur dann erreicht werden, wenn das Störspektrum am Aufstellungsort bekannt ist. Hierzu sind noch Messungen erforderlich, die in ein einem Bauvorschlag vorangehendes Versuchsprogramm aufgenommen werden sollten.

Wir gehen für diese Studie von der Schätzung aus, daß der Störhub unterhalb von 1 kHz liegt, so daß ein Stellbereich für das schnelle Frequenzstellglied von 1 bis 2 kHz ausreichend ist. Auf dieser Annahme beruht auch die im Anhang durchgeführte Berechnung der Parameter für die Regelung und der Verluste auf den Koppelleitungen.

### 3.6 Schnelles Frequenzstellglied

Schnelle Eigenfrequenzänderungen, wie sie durch die beschriebenen Vibrationen entstehen, sind nur solange durch eine Phasenregelung zu kompensieren, wie die Verstimmungen die Bandbreite der Resonatoren nicht wesentlich übertreffen. Dies ist in normalleitenden Resonatoren immer der Fall, so daß hier eine Kombination von Phasen- und Amplitudenregelung verwendet wird. Bei größeren

Verstimmungen muß die Eigenfrequenz nachgestellt werden. Für schnelle Änderungen sind Vorrichtungen, die die Geometrie des Resonators ändern, unzureichend. Es ist jedoch möglich, eine variable Reaktanz über eine Leitung an den Resonator anzukoppeln und dadurch die Verstimmung auszugleichen. Grundsätzlich sind dazu Ferrite, Feldeffektröhren oder PIN-Dioden in dem hier betrachteten Frequenzbereich anwendbar. Es zeigte sich aber, daß zur Zeit Ferrite noch zu langsam sind und sowohl Ferrite als auch Röhren einen zu großen Aufwand für die Ansteuerung benötigen. Für die Ferrite sind hier jedoch in Zukunft Verbesserungen möglich<sup>7</sup>. Frequenzstellglieder mit PIN-Diodenschaltern sind dagegen bereits in Betrieb<sup>8,9,10</sup>. Für die hier diskutierte Anwendung ist ein Mehrpunktstellglied vorteilhaft<sup>6</sup> (siehe Anhang 2). Abhängig von der Größe der gespeicherten Energie im Resonator und vom Stellbereich werden 2 bis 5 Schaltstellungen benötigt. Es ist zu erwarten, daß der verbleibende Phasenfehler für das Resonatorfeld  $<1^\circ$  gehalten werden kann. Die maximale Verlustleistung im Stellglied, die die Leistung des Endverstärkers bestimmt, ist  $\lesssim 100$  Watt.

### 3.7 Tieftemperaturverluste durch HF Leitungen

Jeder Resonator ist über 3 Koaxialleitungen mit Raumtemperatur verbunden, eine Einkoppelleitung, eine Auskoppelleitung für das schnelle Frequenzstellglied und eine Referenzsonde. Durch Wärmeleitung und Stromwärme wird ein Wärmestrom in das Heliumbad geleitet, der sich zu den Supraleiter- und Isolationsverlusten addiert. Besonders kritisch ist die Leitung zwischen Resonator und Stellglied, die durch Blindleistungen von bis zu 4 kVA belastet werden kann (Anhang 2). Trotz Optimierung der Leitungsgeometrie und der Ankopplung an den Resonator können die Heliumverluste bei 1 bis 2 Watt pro Resonator liegen, abhängig von Betriebsfrequenz und Störhub. Durch die Verluste auf den Hochfrequenzleitungen wird die zu installierende Kühlleistung wesentlich mitbestimmt.

### 3.8 Herstellbarkeit der Resonatoren

Helixresonatoren der vorgeschlagenen Art wurden bereits hergestellt und erreichten die angegebenen Feldwerte. Erfahrungen fehlen jedoch noch in der Herstellung mehrerer identischer Resonatoren bezüglich der Streuung der mechanischen und elektrischen Parameter. Für den

54 MHz Resonator ist zu prüfen, ob eine freitragende Wickellänge von ca. 20 cm toleranzgenau ausgeführt werden kann. Die große Anzahl der vorgesehenen Resonatoren und der Vorteil, daß diese Resonatoren identisch sind, sollte eine rationelle Fertigung ermöglichen.

#### 4. Hochfrequenzschaltung

Nach den vorausgehenden Ausführungen über die Eigenschaften des schnellen Frequenzstellgliedes soll nun das Prinzip einer Hochfrequenzeinheit erläutert werden. Die Schaltung ist für alle Resonatoren identisch (Abb. 4). Sie besteht grundsätzlich aus 3 Schaltkreisen:

- 1.) Schnelles Frequenzstellglied mit phasenempfindlicher Brücke, Verstärkern und Korrektur- und Entzerrungsnetzwerk.  
Zweck: Nachstimmen der Eigenfrequenz des Resonators bei schnellen Änderungen mit einem Stellbereich von 1 bis 2 kHz.
- 2.) VCO-Kreis mit phasenempfindlicher Brücke, Verstärkern und Korrekturglied. Zweck: Stabilisierung eines Arbeitspunktes auf der Resonanzkurve, der der Mittellage des schnellen Frequenzstellgliedes entspricht.
- 3.) Amplitudenregelung mit Sollwerteingabe, Detektor, Verstärker, Korrekturglied und Modulator. Zweck: wie (2), zusätzlich Unterdrückung schneller Amplitudenstörungen durch Fehler des Frequenzstellgliedes (siehe Anhang 2), Einstellung der Sollfrequenz.

Ohne auf die Einzelheiten dieser Schaltkreise einzugehen, sind folgende Anmerkungen wichtig: Zur Erhaltung der Stabilität und um Restfehler gering zu halten, sind gegenüber herkömmlichen Regelkreisen erhöhte Kreisverstärkungen zu realisieren. Dabei sind Rauschen, Brummen, Dynamikbereich und Linearität sowie Übersprechen problematisch. Eine Hochfrequenzanordnung, die diesen Anforderungen prinzipiell genügt, ist im IEKP zusammen mit einem supraleitenden  $\lambda/2$  Resonator erfolgreich betrieben worden. Obgleich nunmehr keine grundsätzlichen Probleme zu lösen sind, ist die Entwicklung noch weiter zu verfolgen, um den Kostenaufwand

für eine Hf-Einheit herabzusetzen, der derzeit noch über 50 TDM liegt. In diese Kosten geht mit dem größten Einzelanteil der Endverstärker ein. Die Leistung dieses Verstärkers wird nicht durch Strahlleistung ( $<1$  Watt) oder durch die Supraleiterverluste ( $<1$  Watt) gegeben, sondern durch die Verluste im schnellen Frequenzstellglied und dessen Zuleitungen (siehe Anhang 2). Eine genauere Angabe ist erst möglich nach Festlegung von Frequenz und Stellbereich, es kann aber erwartet werden, daß eine Ausgangsleistung von 100 Watt ausreichend sein wird. Weitere Forderungen an den Endverstärker sind Breitbandigkeit, Linearität und Unempfindlichkeit gegen Laständerungen. Diese Eigenschaften haben die neuerdings bis zu 200 Watt Ausgangsleistung angebotenen Transistorverstärker.

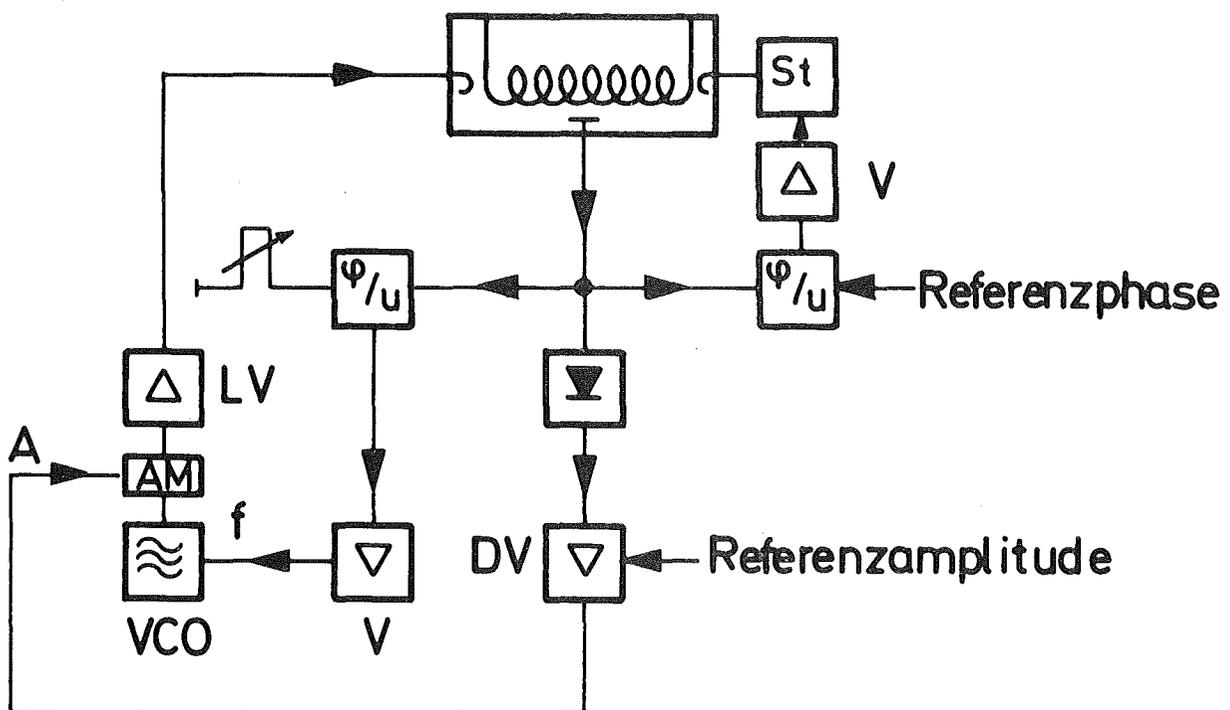


Abb. 4: Hochfrequenzschaltung für einen  $\lambda/2$  Wendelresonator. VCO frequenzmodulierbarer Hf-Generator; LV 100 W Hf-Leistungsverstärker;  $\phi/U$  Phasenvergleichsbrücke; V NF-Verstärker mit Frequenzgangkorrektur; DV Differenzverstärker; St schnelles Stellglied; AM Amplitudenmodulator.

## 5. Teilchendynamik

### 5.1 Radiale Teilchenbewegung

Zur Fokussierung können im Nachbeschleuniger supraleitende Quadrupoldoublets verwendet werden. Rechnungen für die Kette von 108 MHz-Resonatoren<sup>14</sup> ergeben, daß wenn ein Dublett nach jedem fünften Wendelresonator eingesetzt wird, die normierte Akzeptanz in beiden Ebenen und für alle Ionenarten der Massen 12 bis 80 größer ist als 2 cm mrad. Dieses Ergebnis gilt auch für den 54 MHz-Beschleuniger, wenn die Fokussierungselemente nach jedem vierten Resonator plaziert sind. Als Akzeptanzradius wurden in der Rechnung durchgehend 2 cm angenommen. Die nichtlineare Kopplung zwischen longitudinaler und radialer Bewegung wurde berücksichtigt. Die Gradienten in den Quadrupolen sind mit  $< 2.5 \text{ kF/cm}$  unproblematisch. Gegenüber der Emittanz des Vorbeschleunigers ist damit eine Reserve sichergestellt, die einen Faktor 5 bis 10 beträgt.

Geht man von etwa gleicher Strahlqualität aus, dann ergibt sich, daß wegen der unterschiedlichen Anzahl der Resonatoren in beiden Versionen die gleiche Gesamtzahl von 8 Quadrupolen installiert werden muß. Aus der Betrachtung der Transversalbewegung läßt sich daher kein Schluß ziehen, welcher Version der Vorzug zu geben ist.

### 5.2 Longitudinale Teilchenbewegung

Für beide Fälle, 54 und 108 MHz, wurde folgende extreme Anfangsverteilung gewählt: Alle Teilchen sollen in der  $\Delta E/E - \Delta \phi$ -Ebene innerhalb eines Rechtecks liegen, das durch die Eckwerte  $\pm 20 \text{ keV/N}$  und  $\pm 20^\circ$  gebildet wird. Diese Anfangsverteilung wurde für verschiedene Ionenmassen auf den Ausgang der Beschleunigungsstrecke transformiert<sup>15</sup>. Typische Ergebnisse für  $\text{Br}_{79}^{26}$  sind in Abb. 5 a,b gezeigt. Die Energieschärfe am Ende des Beschleunigers beträgt für Brom 1.7% bei 54 MHz und 1.2% bei 108 MHz. Für leichtere Ionen ist die Energieunschärfe geringer. Die Pulsbreite liegt für alle Massen unter oder nur geringfügig über dem Injektionswert.

Die angenommene Anfangsverteilung muß als sehr ungünstig angesehen werden, es darf erwartet werden, daß wesentlich günstigere Einschußwerte erreicht werden. Die Energieschärfe am Ausgang des Beschleunigers sollte deshalb auch ohne Debuncher sicher bei  $< 1\%$  liegen und die Pulslänge  $< 1$  nsec sein.

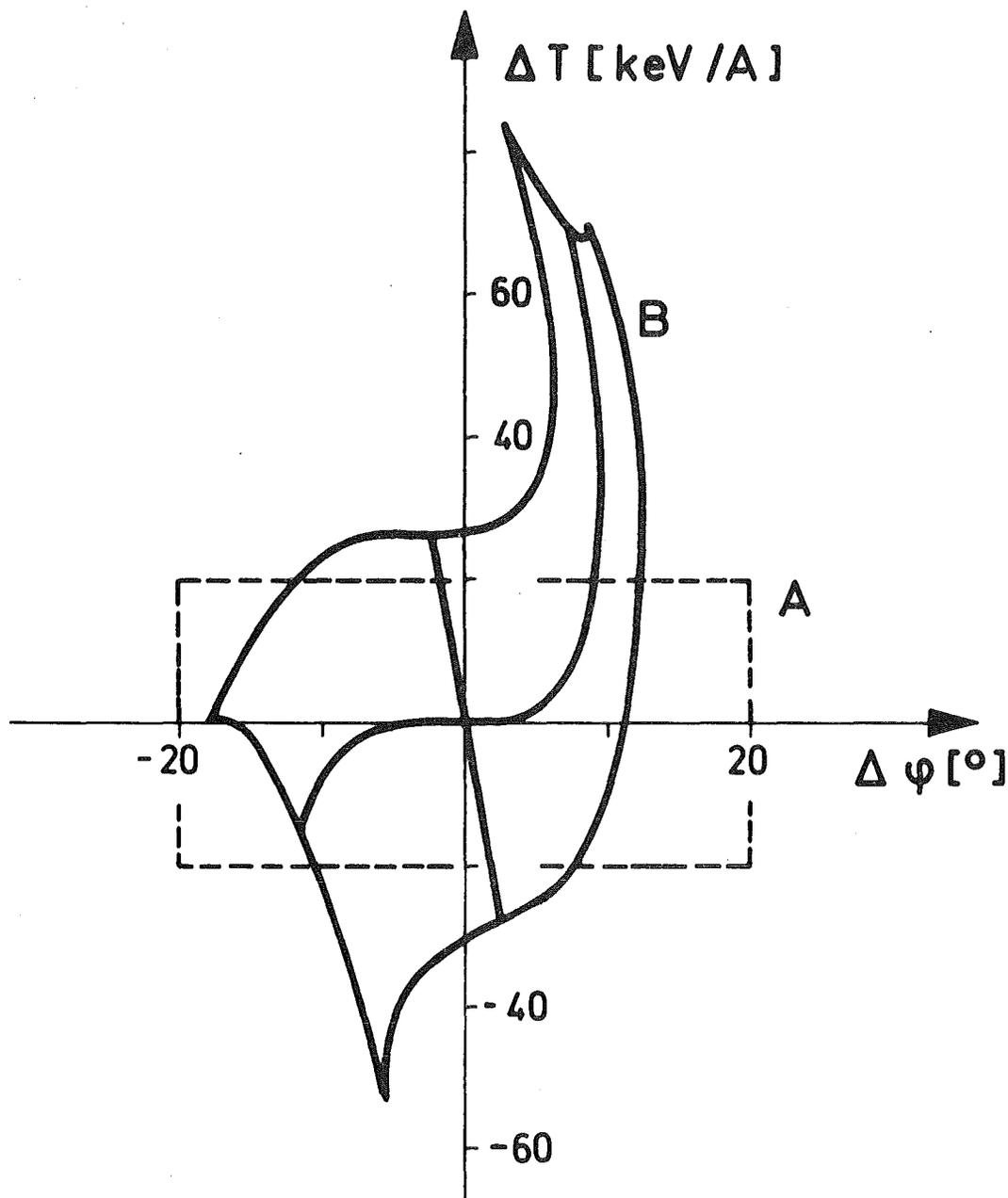


Abb. 5a: Axiale Bewegung im Wendelbeschleuniger für Brom ( $\zeta = 26$ ,  $A = 79$ )  
 $f = 108.48$  MHz,  $DL = 12$  cm,  $DL(F) = 50$  cm  
A: Anfangsverteilung  
B: Verteilung nach dem Beschleuniger

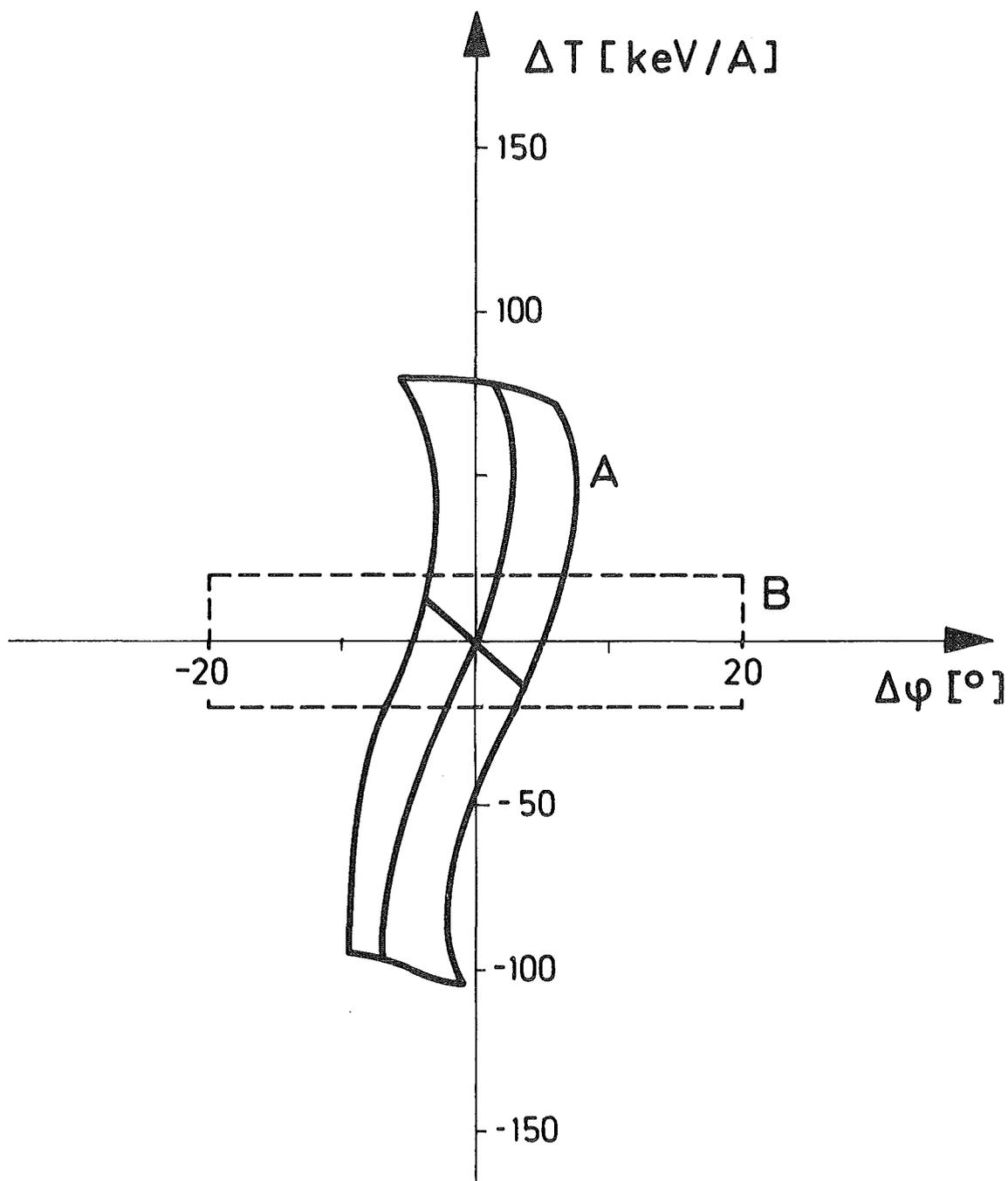


Abb. 5b: Axiale Bewegung im Wendelbeschleuniger  
für Brom ( $\zeta = 26$ ,  $A = 79$ )  
 $f = 54.24$  MHz,  $T_0 = 1.77$  MeV/A  
 $DL = 10$  cm,  $DL(F) = 50$  cm  
A: Anfangsverteilung  
B: Verteilung nach dem Beschleuniger  
Quadrupolabstand  $4/2 \lambda$

## 6. Gesamtkonzept eines supraleitenden Nachbeschleunigers

In den vorstehenden Abschnitten wurden die physikalisch-technischen Probleme für die Nachbeschleunigung umrissen, wobei den spezifischen Eigenschaften supraleitender Helixresonatoren besonderer Raum gegeben wurde. Aus den zuvor angegebenen Orientierungsdaten soll nun versucht werden, ein Gesamtbild eines Nachbeschleunigers im Sinne des Vorwortes zu entwerfen. Hierbei wird die Frequenzalternative 108 bzw. 54 MHz (54 MHz Werte in Klammern) aufrechterhalten.

Der Beschleuniger besteht aus 44 (34) identischen Helixresonatoren. Bei einer elektrischen Länge von 13 (21) cm pro Resonator beträgt die technische Länge einer supraleitenden Zelle mit Strahlrohren 25 (33) cm. Bei Maximalfeldern von 16 MV/m und 600  $\Gamma$  ist die Beschleunigungsspannung pro Zelle etwa 300 (380) KV. In Abständen von 5 (4) Resonatoren folgt ein Quadrupoldublett von 30 cm Länge. Zusammen mit Pumpzwischenstücken und Strahlmonitoren ergibt sich daraus eine Gesamtlänge von etwa 15 m für einen durchgehenden Kryostaten. Der geringe Durchmesser der Helixsektionen von etwa 20 cm macht es möglich, die Außenabmessungen des Kryostaten kleiner als 1 m zu halten. Kühlprinzip ist Helium II - Kühlung mit Superfiltern in Ein- oder Zweivakuumtechnik. Jeder Resonator benötigt 3 Hf-Durchführungen, wovon eine mit Zweikammerkühlung ausgerüstet ist. Gespeist wird jeder Helixresonator durch eine Hf-Einheit von etwa 100 Watt Leistung. Jede dieser Einheiten enthält Amplitudenregelung, schnelles Stellglied mit Mehrpunktregler, frequenzgesteuerten Oszillatorkreis und Endverstärker. Die gesamten Heliumverluste betragen etwa 44 (34) Watt für die supraleitenden Resonatoren,  $44 \times 1,8 = 80$  Watt ( $34 \times 2,5 = 85$  Watt) für die Koppelleitungen und  $3,5 \text{ W/m} \times 15 \text{ m} = 53$  Watt an Isolationsverlusten, also insgesamt 177 (172) Watt.

Dieser Beschleuniger liefert einen Ionenstrahl mit  $\leq 1$  nsec langen Pulsen mit einer Energieschärfe von  $\leq 1\%$ . Unter günstigsten Einschußbedingungen aus dem MP Tandem können für Kohlenstoffionen bis zu 12 MeV/N, für Ionen der Masse 80 noch 6 MeV/N Endenergie erreicht werden.

## 7. Bau- und Betriebskosten

Eine orientierende Kostenrechnung für den beschriebenen Nachbeschleuniger ergibt Investitionskosten von etwa 7 Millionen DM. Der Anteil der Kälteanlage an diesen Kosten beträgt etwa 2.5 MDM, der Aufwand für Hochfrequenz- und Regelungseinheiten wurde mit 2.4 MDM abgeschätzt. Die restlichen Kosten schließen Resonatoren, Strahlführungselemente und Kryostate ein. Im Vergleich zu Abschätzungen für normalleitende Ionenbeschleuniger, wie Talix<sup>11</sup> oder dem Vorschlag normalleitender Einzelresonatoren<sup>12</sup>, ergeben sich etwa gleiche Investitionskosten.

Einsparungen sind für den supraleitenden Beschleuniger besonders bei den Betriebskosten zu erwarten. Während die Anschlußleistung eines normalleitenden Beschleunigers mit gleicher durchfallener Spannung etwa 3 MVA beträgt, ist der supraleitende Beschleuniger mit 400 KVA Anschlußleistung zu betreiben.

Kostenvorteile sind für den supraleitenden Beschleuniger auch durch Wegfall der Kühlwasserkosten und die größere Lebensdauer der Hochfrequenzstufen zu erwarten. Betriebskosten von 400 DM pro Stunde (Talix, Dauerstrichbetrieb) stehen Kosten von etwa 85 DM pro Stunde für den supraleitenden Beschleuniger gegenüber.

Die in dieser Studie angegebenen Daten und Zusammenhänge stützen sich auf Arbeiten in den beteiligten Instituten. Für spezielle Beiträge danken die Autoren besonders

J. Klabunde (GSI-Außenstelle im IAP, Frankfurt, Fokussierung),  
O. Siart (GSI-Außenstelle im IAP, Frankfurt, Helixparameter),  
A. Schempp (IAP, Helixparameter), G. Hochschild (IEKP, schnelles Stellglied), G. Krafft (jetzt Universität Paderborn, Kühlung), B. Piosczyk (IAKP, Supraleitungseigenschaften) und  
D. Schulze (IEKP, Frequenzeinstellung und Hf-Schaltung).

Die Studie wurde von J. E. Vetter zusammengestellt.

## A N H A N G 1

### Statische Frequenzverschiebung

Die statische Frequenzverschiebung ist näherungsweise berechenbar<sup>5</sup>. Die Näherungen sind folgende:

1. In kurzen Resonatoren sind die Feldverteilungen durch Randfelder gestört. In den Rechnungen sind bisher nur Feldansätze für unendlich lange Wendeln berücksichtigt.
2. Die Eigenfrequenzänderungen werden so betrachtet, als läge eine reine Kompression in Achsenrichtung vor.
3. Der Schubmodul ist für tiefe Temperaturen nicht bekannt, es wird i. A. der Schubmodul bei Raumtemperatur verwendet.

Rechnungen mit diesen Voraussetzungen liefern bis zu einem Faktor 2 von Messungen abweichende Ergebnisse. Derartige Meßergebnisse liegen für 3 verschiedene  $\lambda/2$  Wendeln um 90 MHz vor. Bei Vergleich dieser Messungen zeigte sich aber, daß die Geometrieabhängigkeit durch die Rechnung recht gut wiedergegeben wird. Bei den hier aufgeführten Ergebnissen wurde deshalb die Messung derjenigen Wendel, deren Geometrie den für den Nachbeschleuniger vorgesehenen Wendeln am ähnlichsten ist, zu einer Anpassung der Rechenwerte benutzt. Die Abbildung 6 gibt die statische Frequenzverschiebung normiert auf ein Achsenfeld von 1 MV/m (laufende Wellenkomponente) als Funktion des Wendelradius  $a$  wieder. Die Steigung  $s$  ist Parameter. Als Rohrdurchmesser wurden 8 mm gewählt, Wandstärke ist 1 mm. Es zeigt sich, daß die Frequenzverschiebung bei 54 MHz proportional  $a^3$  ist und kaum von der Steigung abhängt. Für 108 MHz ist die Radiusabhängigkeit stärker. Beide nach Gesichtspunkten der Spitzenfelder ausgewählten Wendeln haben annähernd gleiche absolute Frequenzverschiebung. Mit den maximalen Achsenfeldern beträgt diese 123 kHz für 54 MHz und 99 kHz für 108 MHz. Trotzdem ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen: Die Toleranzanforderung an den Wendelradius ist bei 108 MHz einschneidender.

$\Delta f_{\text{stat}}$  / kHz bei  $E_0 = 1 \text{ MV/m}$

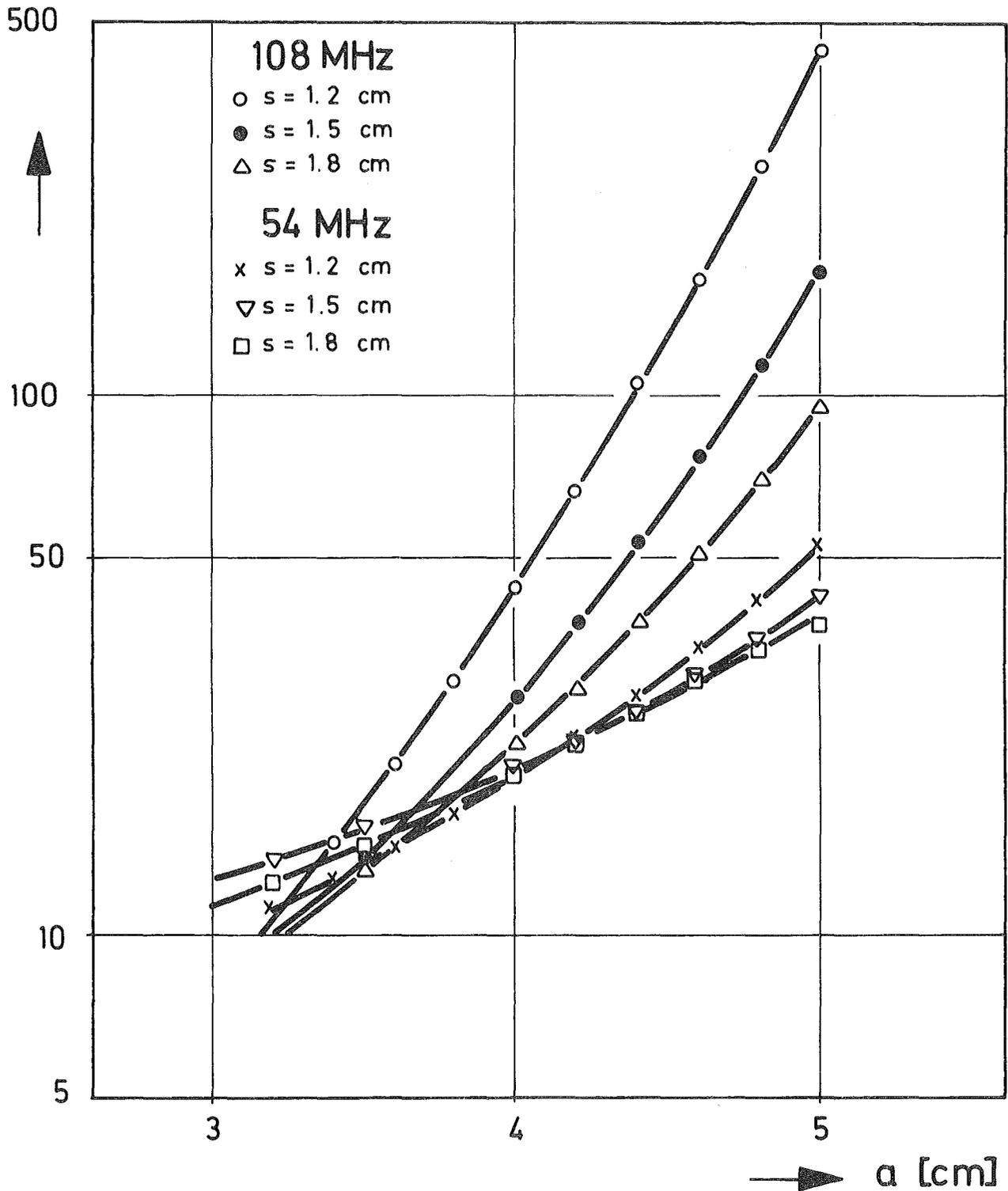


Abb. 6: Statische Frequenzverschiebung für ein Beschleunigungsfeld von 1 MV/m in Abhängigkeit vom Helixradius. Parameter ist die Helixsteigung  $s$ .

Man kann annehmen, daß die Empfindlichkeit der Wendel auf äußere Störungen (Vibrationen) der statischen Frequenzverschiebung proportional ist. Diese Annahme ist dann gerechtfertigt, wenn ein statistisches Störspektrum vorliegt, wie weit das in der Praxis der Fall ist, muß experimentell ermittelt werden. Im Falle eines vorwiegend statistischen Störspektrums ist die 108 MHz Wendel günstiger, da das Stellglied, das diesen schnellen Eigenfrequenzstörungen entgegenwirkt, für eine Leistung ausgelegt werden muß, die der relativen Frequenzverschiebung  $\Delta f/f_0$  proportional ist (s. Abschnitt 3.4) Auch die Verluste in der Speiseleitung (Abschn.3.5) sind bei 108 MHz kleiner.

### Schnelle Frequenzstellglieder mit PIN-Diodenschaltern

Schnelle Korrekturen der Eigenfrequenz sind nötig, um den Einfluß äußerer Störungen auf die Phasenbeziehung zwischen Teilchen und Beschleunigungsfeld zu reduzieren. Da die Phase Frequenzänderungen nur mit Verzögerung folgt, ist es möglich, die Frequenzkorrektur schrittweise vorzunehmen. Hierzu eignen sich PIN-Diodenschalter. Es haben sich zwei Prinzipien entwickelt: beim Zweipunktstellglied wird zwischen zwei Zuständen (Frequenzen) geschaltet. Durch das Integrationsverhalten des Resonators wird die Wirkung auf die Resonatorphase verzögert. Die Zeit, die der Schalter in einer Stellung verbleibt, bestimmt die Größe der Frequenzkorrektur. Vorteil der Zweipunktstellglieder ist, daß eine konstante Wirklast für den Resonator entsteht. Amplitudenfehler werden auf diese Weise vermieden. Dagegen bleibt ein Phasenfehler zurück, der von der Schaltfrequenz abhängt. Bei praktisch erreichbaren Schaltfrequenzen beträgt der verbleibende Fehler typisch mehrere Grad. Bei größeren Anforderungen an die Stabilität der Phase ist ein zusätzlicher Phasenregelkreis nötig. Da das Produkt von Schaltfrequenz und geschalteter Leistung eine kritische Eigenschaft der PIN-Diode ist, und nur eine geringe Anzahl Dioden parallelgeschaltet werden können, ist der Stellbereich von 2 Punktstellgliedern praktisch begrenzt.

Für größere Störhübe, und wenn kleinere Phasenfehler erwünscht sind, hat sich ein Mehrpunktstellglied bewährt.<sup>16</sup> Hierbei wird die Energieleitung zwischen Resonator und Schaltern symmetrisch verzweigt, so daß die Schaltleistung auf mehrere Schalter gleichmäßig verteilt wird. Die Wirkung der Schalter ist so, daß sich der Stelleffekt der einzelnen Schalter summiert, die Frequenz wird durch die Anzahl der geschalteten Dioden bestimmt. Durch diese Unterteilung des Stellbereichs in so viele Schritte wie PIN-Dioden installiert sind, ist es möglich, die verbleibenden Phasenfehler zu vermindern. Dabei ist aber die Wirklast für den Resonator von der Zahl der geschalteten Dioden abhängig, so daß sich, anders als beim Zweipunktstellglied, Laständerungen für den Resonator ergeben, die Amplitudenstörungen bewirken. Ein Stellglied mit Mehrstufenwirkung benötigt daher eine Amplitudenregelung. Diese ist aber zur Bekämpfung pon-

deromotorischer Instabilitäten grundsätzlich erwünscht, in der Praxis sogar notwendig, wie sich in im IEKP durchgeführten Versuchen am Prototyp Karlsruhe gezeigt hat.

Welcher Stellgliedertyp für den Nachbeschleuniger infrage kommt, hängt hauptsächlich von der Größe des tatsächlichen Störhubs ab. Deshalb wurden in Tabelle 8 beide Versionen berücksichtigt. Zum Verständnis der Tabelle ist der Zusammenhang zwischen Blindleistung und Frequenzstörung nachzutragen: Die Blindleistungsänderung  $\Delta P_b$  ist aus der gespeicherten Energie  $W$  im Resonator und der Verstimmung gegenüber der Mittellage  $\Delta f$  durch

$$\Delta P_b = 4 \pi W \Delta f$$

gegeben. Hier zeigt sich, daß der 108 MHz Resonator mit einer gespeicherten Energie von 0,13 Ws weniger als die Hälfte Blindleistungsänderung zur Kompensation gleicher Frequenzstörung benötigt, als der 54 MHz Resonator, dessen gespeicherte Energie 0,33 Ws beträgt.

Der Vorteil des Mehrpunktstellgliedes, geringe Phasenfehler zu erzeugen, geht aus Tabelle 8 deutlich hervor. Um einen gleichgroßen Phasenfehler von  $0.9^\circ$  wie bei einem mit 2 Schritten ausgerüsteten Mehrpunktstellglied zu erreichen (Tab. 8, 108 MHz, 1 kHz Störhub), müßten bei einem Zweipunktstellglied 8 Dioden parallel geschaltet werden. Es ist daher anzunehmen, daß ein Mehrpunktstellglied verwendet wird, wobei die Zahl der Schritte und damit ein Teil des Aufwandes durch den Störhub bestimmt sein wird. Der Betrieb des Stellgliedes ist mit Verlusten verbunden. Die Verluste entstehen einmal auf den HF Leitungen, zum anderen in den Dioden selbst. Im allgemeinen sind die Verluste in den Dioden der vorherrschende Anteil. Für eine grobe Abschätzung kann man davon ausgehen, daß die gesamte Verlustleistung die Summe der zulässigen Verlustleistungen (20 W pro Diode) in den Dioden nicht übersteigt. In den hier interessierenden Fällen ist daher mit Verlusten von  $< 100$  W im Stellglied zu rechnen. Diese Leistung muß vom HF Endverstärker gebracht und dem Resonator zugeführt werden.

Tab. 4 : Mögliche Ausführungen von schnellen Frequenzstellgliedern.  
 Die Schaltfrequenzen sind so gewählt, daß das Produkt von Blindleistungsänderung und Schaltfrequenz 20 kHz·kVA nicht übersteigt. Die Anzahl der Dioden beim Mehrpunktstellglied ist so gewählt, daß der verbleibende Phasenfehler < 1° ist.

Frequenz		54 MHz		108 MHz	
gesp. Energie		0.33 VAS		0.13 VAS	
Störhub <sub>pp</sub>		1 kHz	2 kHz	1 kHz	2 kHz
Blindleistungsänderung		2,1 KVA	4,2 KVA	0,82 KVA	1,64 KVA
Zweipunktstellglied	Anzahl Dioden	2	4	1	2
	Schaltfrequenz	9,6 kHz	9,6 kHz	12,2 kHz	12,2 kHz
	Phasenfehler	± 9,3°	± 18,7°	± 7,4°	± 14,7°
Mehrpunktstellglied	Anzahl Dioden	3	5	2	4
	wirksame Schaltfrequenz	43,4 kHz	60,2 kHz	49 kHz	49 kHz
	Phasenfehler	± 0,7°	± 0,6°	± 0,9°	± 0,5°

### A N H A N G 3

#### Verluste in den Leitungen zwischen Resonator und Stellglied

Es wurde gezeigt, daß das Stellglied durch Leistungen von mehreren kVA belastet werden kann, abhängig von der Größe der Verstimmung (Anhang 2). Da das Stellglied selbst nur bei Raumtemperatur funktioniert, muß eine Koaxialleitung den Energieaustausch zwischen supraleitendem Resonator und Stellglied vermitteln. Es zeigt sich, daß diese Leitung einen erheblichen Anteil der Tieftemperaturverluste bewirkt: Über die Leiterwand wird durch Wärmeleitung einerseits und Stromwärmeverluste andererseits Wärme eingeführt, die bei Tieftemperatur aufgenommen werden muß. Der an den Resonator angrenzende Teil der Koppelleitung muß dabei aus supraleitendem Material ausgeführt werden, da sonst zu hohe Stromwärme durch die Resonatorfelder im Koppellelement erzeugt würde. Eine Möglichkeit der Ausführung besteht darin, einen Teil des Zwischenraumes zwischen Innen- und Außenleiter mit dem Heliumbad zu verbinden. Die von dieser Kühlkammer aus dem Kryostaten herausführende Koaxialleitung muß so optimiert werden, daß der an die tiefe Temperatur abgeführte Wärmestrom minimal wird. Zur Optimierung können Wellenwiderstand, Querschnitt und Länge der Leitung, sowie Material und Dicke der Leitschicht und des Trägermaterials herangezogen werden.

Eine weitere Senkung der Verluste bei Heliumtemperatur kann dadurch erreicht werden, daß eine weitere mit flüssigem Stickstoff gespeiste Kühlkammer in die Leitung eingefügt wird, die einen Teil der Verluste übernimmt (Zwei-Kammerkühlung). Weitere konstruktive Möglichkeiten können den Anteil der Koppelleitungen an den Tieftemperaturverlusten senken, bedürfen aber noch der Entwicklung. Der Weg, der hier zu den günstigsten Resultaten führt, ist insbesondere von der Größe des Störhubs abhängig, da dieser (siehe Anhang 2) die Größe der Stromamplituden bestimmt. Für diese Studie wird von der oben skizzierten Kühlung durch eine bzw. zwei Kühlkammern ausgegangen. Die Tieftemperaturverluste bei optimalen Leitungseigenschaften sind in Tabelle 9 zusammengefaßt: Die Verluste pro Resonator sind bei 108 MHz etwa 60% der Verluste bei 54 MHz. Für den gesamten Beschleuniger sind die Verluste wegen der unterschiedlichen Anzahl der Resonatoren jedoch etwa gleich. Die Verluste in der Einkoppelleitung und der Leitung

zur Referenzsonde sind wegen der geringeren Strombelastung nicht berücksichtigt.

Tab. 5: Geringste Tieftemperaturverluste der HF Leitung zwischen Frequenzstellglied und supraleitendem Resonator bei Ein- und Zweikammerkühlung.

Frequenz		54 MHz		108 MHz	
Störhub		1 kHz	2 kHz	1 kHz	2 kHz
Blindleistung		2,1 kVA	4,2 kVA	0,8 kVA	1,6 kVA
Einfachkühlung	He-Verluste	2,2 W	3,1 W	1,3 W	2,0 W
2 Kammerkühlung He / N <sub>2</sub>	He-Verluste	0,9 W	1,3 W	0,6 W	0,9 W
	N <sub>2</sub> -Verluste	1,8 W	2,5 W	1,3 W	1,9 W

### Kühlungsprinzipien, Begrenzung der abführbaren Wärmemenge

Als Kühlmittel im Temperaturbereich  $< 4.2$  K kommt nur Helium in Frage. Helium tritt in zwei Zuständen auf: Helium I bei Temperaturen oberhalb des  $\lambda$ -Punktes ( $T = 2.17$  K) und Helium II bei  $T \leq 2.17$  K (superfluides Helium). Außerdem ist zu unterscheiden zwischen ruhendem und strömendem Kühlmittel. Die sich hieraus ergebenden Kühlarten sollen kurz diskutiert werden im Hinblick auf ihre Eignung für die Kühlung des Nachbeschleunigers.

#### 1. Kühlung mit ruhendem Helium I bei 4.2 K

Die Wärmeleitung erfolgt über Konvektion oder Blasensieden. Für waagrecht angeordnete Helices ist diese Kühlung ungeeignet, da sich der entstehende He-Dampf in den oberen Teilen der Windungen fängt und den Wärmefluß unterbindet. Bei vertikal angeordneten Wendeln sind durch Konvektion bis zu einigen Watt ohne Oszillationen abführbar. (Alle Angaben beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf ein Rohr mit  $8 \times 1$  mm  $\emptyset$ ).

#### 2. Kühlung mit strömendem Helium I

Abhängig davon ob der Druck kleiner oder größer als der kritische Druck ( $p_c = 2,25$  atm) ist, bildet sich ein Flüssigkeits-Dampf-Gemisch ( $p \leq p_c$ ) oder superkritische Flüssigkeit ( $p > p_c$ ). Die Temperatur und die abführbare Wärmemenge sind Funktion des Massendurchsatzes.

So kann z.B. in einem 3 m langen Rohr mit 5 mm lichter Weite bei 4 atm Druck 1 Watt abgeführt werden, wenn 2 g/sec Helium mit einer Temperatur von 4.35 K durchströmen. Der Temperaturabfall beträgt in diesem Fall entlang des Rohres nur 3/100 K, der Druckabfall nur 3/1000 atm. Die abführbare Wärmemenge läßt sich durch größeren Durchsatz in weiten Grenzen steigern, so daß diese Kühlungsart durch eine große Kühlreserve ausgezeichnet ist.

Kühlung mit Helium I hat den Vorteil einer um 30 bis 50 % billigeren Kälteanlage und bietet eine große Kühlungsreserve. Der Aufwand für das Überdrucksystem bei Drücken von ca. 5 atm,

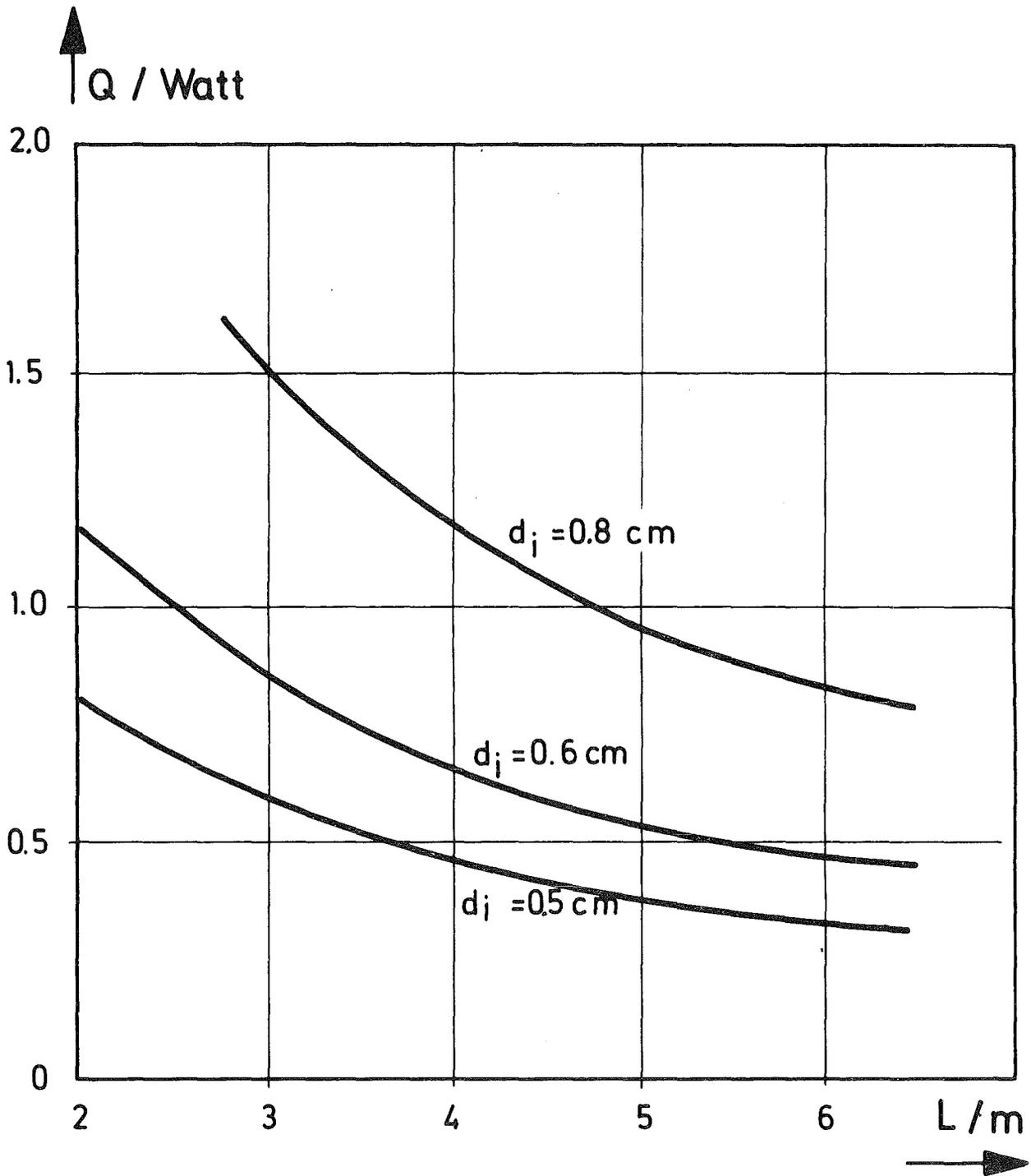


Abb. 7: Maximale Wärmemenge, die von einer Wendel der Länge  $L$  und der Rohrweite  $d_i$  an ein superfluides Bad mit einer Temperatur von 1.8 K abgegeben werden kann

um die notwendige Lecksicherung zu erreichen, ist aber mangels Erfahrungen schlecht abschätzbar. Entscheidend für die Vorbehalte, die bei der hier diskutierten Anwendung bestehen, ist aber die Neigung zu Instabilitäten. Diese treten besonders unter folgenden Bedingungen auf:

- a)  $p < p_c$ , Zweiphasengebiet
- b) niedrige Wärmekapazität des festen Materials
- c) kleine Rohrweiten, schlanke Rohre  $L/d \gg 1$ .

Die Punkte b) und c) sind bei der Kühlung von Wendelrohren immer gegeben.

Diese Instabilitäten können zu Störungen der elektrischen Eigenfrequenzen beitragen. Erfahrungen mit dieser Kühlung für Wendeln liegen noch nicht vor, wären aber wünschenswert.

### 3. Kühlung mit ruhendem Helium II

Dieses Verfahren wurde bisher zur Kühlung von Wendelresonatoren angewendet. Es existieren ausführliche Messungen an Wendeln verschiedener Rohrweiten und Längen. Die maximale Kühlkapazität ist durch einsetzende Blasenbildung gegeben. Die Abhängigkeit von Rohrweite und Länge ist in Abb. 7 gegeben. Für die hier vorgeschlagenen Resonatoren liegt die Grenze etwa bei 0.6 Watt (54 MHz) bzw. 1 Watt (108 MHz). Die Belastungsgrenze ist strikt und nur wenig durch die Wahl der Badtemperatur zu beeinflussen.

### 4. Kühlung mit strömendem Helium II

Pumpen für superfluides Helium sind noch nicht entwickelt. Eine einfache Möglichkeit, einen Massentransport zu erreichen, ist aber durch Superfilter an einem Rohrende gegeben. Erste Versuche ergaben bei einer Badtemperatur von 1.8 K eine Erhöhung der Kühlkapazität auf 4 - 6 Watt <sup>13</sup>. Durch Einsatz von Superfiltern kann daher der Nachteil der begrenzten Kühlkapazität vermieden werden.

Die Vorteile der He II Kühlung sind also einfacher Aufbau des Kühlsystems, Erweiterungsmöglichkeit der Kühlkapazität durch Superfilter und für die Supraleiter günstige niedrige Betriebstemperatur. Günstig ist außerdem die umfangreiche Erfahrung bei der Anwendung für Helixresonatoren im IEKP. Demgegenüber

stehen die Nachteile einer teureren Kältemaschine und die Gefahr von Lecks für superfluides Helium, der nur teilweise durch eine geeignete Kryostatenkonstruktion (2-Vakuum-System) vorgebeugt werden kann.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- 1 Überlegungen zu einer Nachbeschleunigungsstrecke für mittelschwere Ionen am Heidelberger MP Tandembeschleuniger, MPI-H-1972-V 26
- 2 Proc. of the 1970 Proton Lin. Acc. Conf., NAL Batavia I, 293 und H. Klein et al., Particle Accelerator, 3, 235, 1972
- 3 S. Papureanu et al., Die n-sec-Pulsung für den MP Tandembeschleuniger, int. Bericht, MPI Heidelberg
- 4 A. Schempp, Dissertation, Universität Frankfurt, 1973 und H. Klein et al., Proc. of the 1972 Proton Lin. Acc. Conf., Los Alamos, 265
- 5 D. Schulze, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1972
- 6 G. Hochschild Dissertation, Universität Karlsruhe, 1974
- 7 L. Szecsi, IEKP Karlsruhe, priv. Mitteilung
- 8 O. Despe et al., Proc. of the 1973 Part. Acc. Conf., San Francisco
- 9 D. Schulze et al., Proc. of the 1972 Proton Lin. Acc. Conf., Los Alamos und
- 10 D. Schulze et al. Proc. of the 1973 Part. Acc. Conf., San Francisco
- 11 H. Klein et al., Nucl. Instr. 97, 1 (1971)
- 12 E. Jaeschke, priv. Mitteilung
- 13 G. Krafft, IEKP Karlsruhe, priv. Mitteilung
- 14 H. Deitinghoff, J. Klabunde, Int. Rep. 73/6, Universität Frankfurt
- 15 J. Klabunde, Int. Rep. 73/5, Universität Frankfurt