

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Dezember 1977

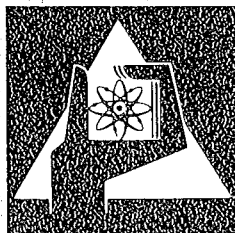
KFK 2541

Institut für Kernphysik

**Ein supraleitender Wendel-Nachbeschleuniger
für mittelschwere Ionen
Experimentelle Vorarbeiten und Entwurf**

G. Hochschild, H. Ingwersen*, E. Jaeschke*,
W. Lehmann, B. Piosczyk, R. Repnow*,
F. Spath, J. E. Vetter, Th. Walcher*

* Max-Planck-Institut für Kernphysik, 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 2541

Institut für Kernphysik

Ein supraleitender Wendel-Nachbeschleuniger für
mittelschwere Ionen

Experimentelle Vorarbeiten und Entwurf

G. Hochschild, W. Lehmann, B. Piosczyk,
F. Spath, J. E. Vetter, H. Ingwersen⁺,
E. Jaeschke⁺, R. Repnow⁺, Th. Walcher⁺

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

⁺ Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

Zusammenfassung

Es wird das Konzept eines Linearbeschleunigers vorgestellt, der kurze supraleitende Hochfrequenzresonatoren als Beschleunigungselemente enthält. Durch Einsparung an Hochfrequenzleistung wird eine deutliche Reduzierung der Betriebskosten gegenüber normalleitenden Resonatoren erreicht. Ein derartiger Nachbeschleuniger ermöglicht es, nach einem MP-Tandem mittelschwere Ionen nach Erhöhen ihres Ladungszustands wirksam weiterzubeschleunigen.

Der Entwurf bestätigt und konkretisiert die in einer Studie 1973 zusammengefaßten Projektionen über Leistung und Kosten eines supraleitenden Nachbeschleunigers. Die zugrundegelegten Parameter wurden aus Erfahrungen mit einer im Institut für Experimentelle Kernphysik des Kernforschungszentrums Karlsruhe entwickelten 1 m - Teststrecke gewonnen, die von Juni 1976 bis Februar 1977 am Schwerionenstrahl des MP-Tandems des Max-Planck-Instituts für Kernphysik, Heidelberg in vier Beschleunigungs- und drei Bestrahlungsexperimenten sowie während insgesamt 1000 h Kryobetrieb und 500 h Hochfeldbetrieb der Resonatoren untersucht wurde. Die Ergebnisse dieser Experimente und insbesondere die Erfahrungen mit der Teststrecke im "Alltagsbetrieb" an einer Tandembeschleunigeranlage werden zusammenfassend dargestellt.

Das beschriebene System ist modular und erweiterungsfähig. Der hier als Beispiel aufgeführte Entwurf geht von der Errichtung von vier Einheiten aus, die eine gesamte durchfallene Spannung von 9.4 MV liefern. Insgesamt 32 supraleitende Wendelresonatoren werden bei einer Betriebsfrequenz von 108.5 MHz individuell gespeist. Phasenregelungen sorgen für Synchronisation der Einzelelemente. Die Kälteleistung von 200 W bei 4.4 K wird durch Zweiphasenströmung von Helium und Badkühlung übertragen. Die Anschlußleistung des Linearbeschleunigers ohne Strahlführungs- und Strahlpräparationseinrichtungen beträgt 200 kW. Hierfür belaufen sich die Investitionen auf ca. 4.4 MDM, die Betriebskosten (ohne Personal und Abschreibung) bei einer jährlichen Betriebszeit von 3 000 h auf ca. 60 DM/h.

A Superconducting Post Accelerator for Medium Mass Ions
with Helically Loaded Resonators
Preparatory Experiments and Design

Abstract

The concept is presented of a linear accelerator equipped with short superconducting resonators as accelerating elements. Saving high-frequency power remarkably reduces the operating costs as compared with normal conducting resonators. This post accelerator allows that, having passed an MP tandem, medium mass ions get further accelerated effectively after their charge state has been increased.

The design confirms and gives shape to the projects covered by a study of 1973 on the performance and cost of a superconductive post accelerator. The design parameters are the result of experience gathered with a 1 m long test section developed at the Institute für Kernphysik of the Karlsruhe Nuclear Research Center. This test section was investigated from June 1976 until February 1977 with the heavy ion beam of the MP tandem of the Max-Planck Institut für Kernphysik, Heidelberg in four acceleration and three irradiation experiments as well as during 1000 h of cryo-operation in total and 500 h of high field operation of the resonators. The results of these experiments and in particular the experiences obtained with the test section in the everyday operation of a tandem accelerator system will be summarized.

The system described is of the modular type and can be extended. The design presented as an example is based on the erection of four units yielding an overall accelerating potential of 9.4 MV. A number of 32 superconductive helical resonators are fed individually at an operating frequency of 108.5 MHz. Phase controls ensure the synchronization of the individual elements. The refrigeration capacity of 200 W at 4.4 K is transferred by two-phase flow of helium and by cooling in a bath. The mains power consumption of the linear accelerator is 200 kW. The necessary investment costs amount to 4.4 million DM, the operating costs (without staff and depreciation) to about DM 60 per hour for 3000 h of operating time per year.

1	Einleitung	3
2	Der Einsatz von Nachbeschleunigern an Tandem- maschinen.	4
2.1	Aufgaben eines Nachbeschleunigers	4
2.2	Anforderungen an Tandem und Nachbeschleuniger	7
3	Experimentelle Vorarbeiten	10
3.1	Die SNB - Teststrecke	11
3.1.1	Resonatoren	11
3.1.2	Hochfrequenzversorgungs- und Regelungssystem	18
3.1.3	Kryosystem	22
3.2	Strahlexperimente mit der Teststrecke	25
3.2.1	Beschleunigungsexperimente	25
3.2.2	Bestrahlungsexperimente	25
3.3	Betriebserfahrungen	27
4	Technisches Konzept eines supraleitenden Wendel- Nachbeschleunigers	31
4.1	Resonatoren	33
4.2	Fokussierung und Strahldynamik	33
4.3	Hochfrequenzsystem	36
4.4	Vakuumeinrichtungen	37
4.5	Kryostate und Transferleitungen	39
4.6	Kälteanlage	44
4.7	Gesamtaufbau	47
5	Aufwand für Bau und Betrieb	50
5.1	Bau des Nachbeschleunigers	51
5.2	Betrieb	54
5.3	Investitionskosten	55
5.4	Betriebskosten	57

1. Einleitung

Tandembeschleuniger mit Terminalspannungen um 12 MV werden in vielen Beschleunigungslaboratorien in zunehmendem Maße für die Beschleunigung mittelschwerer Ionen eingesetzt. Um das zugängliche Energiegebiet zu erweitern, besteht vielerorts aktives Interesse an einer Nachbeschleunigung der Ionen in einem flexiblen Linearbeschleuniger, der typisch 10 - 15 MV durchfallene Spannung bis zu einer Massenzahl $A \sim 80$ bei guter Strahlqualität und geringen Betriebskosten liefern sollte.

Im Zuge der Prototyparbeiten für einen supraleitenden Protonenlinearbeschleuniger sind am Institut für Experimentelle Kernphysik Karlsruhe (IEKP) Wendelresonatoren entwickelt worden, die sich auch für die Beschleunigung von schweren Ionen eignen. Im Jahre 1973 wurde daraufhin von Mitarbeitern des IEKP, des Max-Planck-Instituts für Kernphysik Heidelberg (MPI H) und des Instituts für Angewandte Physik der Universität Frankfurt eine "Studie zum Bau eines Nachbeschleunigers für mittelschwere Ionen mit supraleitenden Helixresonatoren"¹ erarbeitet, die orientierende Angaben lieferte. Abschätzungen in dieser Studie ergaben, daß 44 Wendelresonatoren eine durchfallene Spannung von 13 MV (6 MeV/N für $^{79}\text{Br}^{26+}$ bei einer Einschußenergie von 1.77 MeV/N) erbringen können. Um eine größtmögliche Flexibilität - d.h. Verfügbarkeit der installierten Spannung über einen weiten Teilchengeschwindigkeitsbereich - zu erreichen, sollen die Resonatoren elektrisch unabhängig voneinander betrieben werden, so daß das Geschwindigkeitsprofil für Ionen in einem weiten Massenbereich durch geeignete Wahl der Phasen eingestellt werden kann.

Da am MPI H und am IEKP Interesse daran bestand, dieses Konzept, das gegenüber einem normalleitenden Beschleuniger bei vergleichbaren Investitionskosten deutlich verringerte Betriebskosten versprach¹, unter Alltagsbedingungen zu erproben und insbesondere die Handhabbarkeit und Zuverlässigkeit der verwendeten Hf-Supraleitungstechnologie zu prüfen, wurde zwischen beiden Instituten die Errichtung einer supraleitenden Testsrecke und deren Betrieb im Schwerionenstrahl des MP-Tandems des MPI H vereinbart.

Dieses gemeinsame Vorhaben wurde im Zeitraum von Mitte 1974 bis Anfang 1977 verwirklicht. Die Teststrecke mit zwei Resonatoren in einem Kryostaten und dem dazugehörigen Hochfrequenz-System wurde im IEKP entwickelt und aufgebaut. Von Mitte 1976 bis Anfang 1977 war die Teststrecke (Abb. 1) im Strahlweg des MP-Tandems im MPIH installiert. Über die während des Probebetriebes gesammelten Erfahrungen und die Ergebnisse der Strahl- experimente soll zusammenfassend in Kap. 3 berichtet werden.

Nach diesen umfangreichen Vorarbeiten ist jetzt eine Präzisierung des Konzeptes eines supraleitenden Nachbeschleunigers (SNB) möglich. Als Anwendungsbeispiel wird in Kap. 4 ein Nachbeschleuniger mit einer effektiv durchfallenen Spannung von 9.4 MV beschrieben. Die Aufwendungen für Bau und Betrieb eines solchen Gerätes sind in Kap. 5 zusammengefaßt.

Das allgemeine Interesse an der Nutzung der Hf-Supraleitung zur Schwerionen-Nachbeschleunigung sowie der derzeitige Stand der Technologie werden anhand von Entwicklungen von Niob-Split Ring-Resonatoren (Argonne³), Blei-Split Ring-Resonatoren (Pasadena und Stony Brook⁴) und Niob-Reentrant-Kavitäten (Stanford⁵) deutlich. Eine vergleichende Übersicht dieser Arbeiten wird in ⁶ gegeben.

2. Der Einsatz von Nachbeschleunigern an Tandemmaschinen.

2.1 Aufgaben eines Nachbeschleunigers

Mit elektrostatischen Tandembeschleunigern vom Bautyp MP⁷ wurde in den letzten 10 - 15 Jahren in vielen Beschleunigerlabors die entscheidende experimentelle Grundlage für die Schwerionenphysik gelegt. Zusammen mit hochspezialisierten Quellen für negative Schwerionen sind diese Maschinen - viel stärker als bei Experimenten mit leichten Teilchen - zu einem integralen Bestandteil der Experimente selbst geworden,

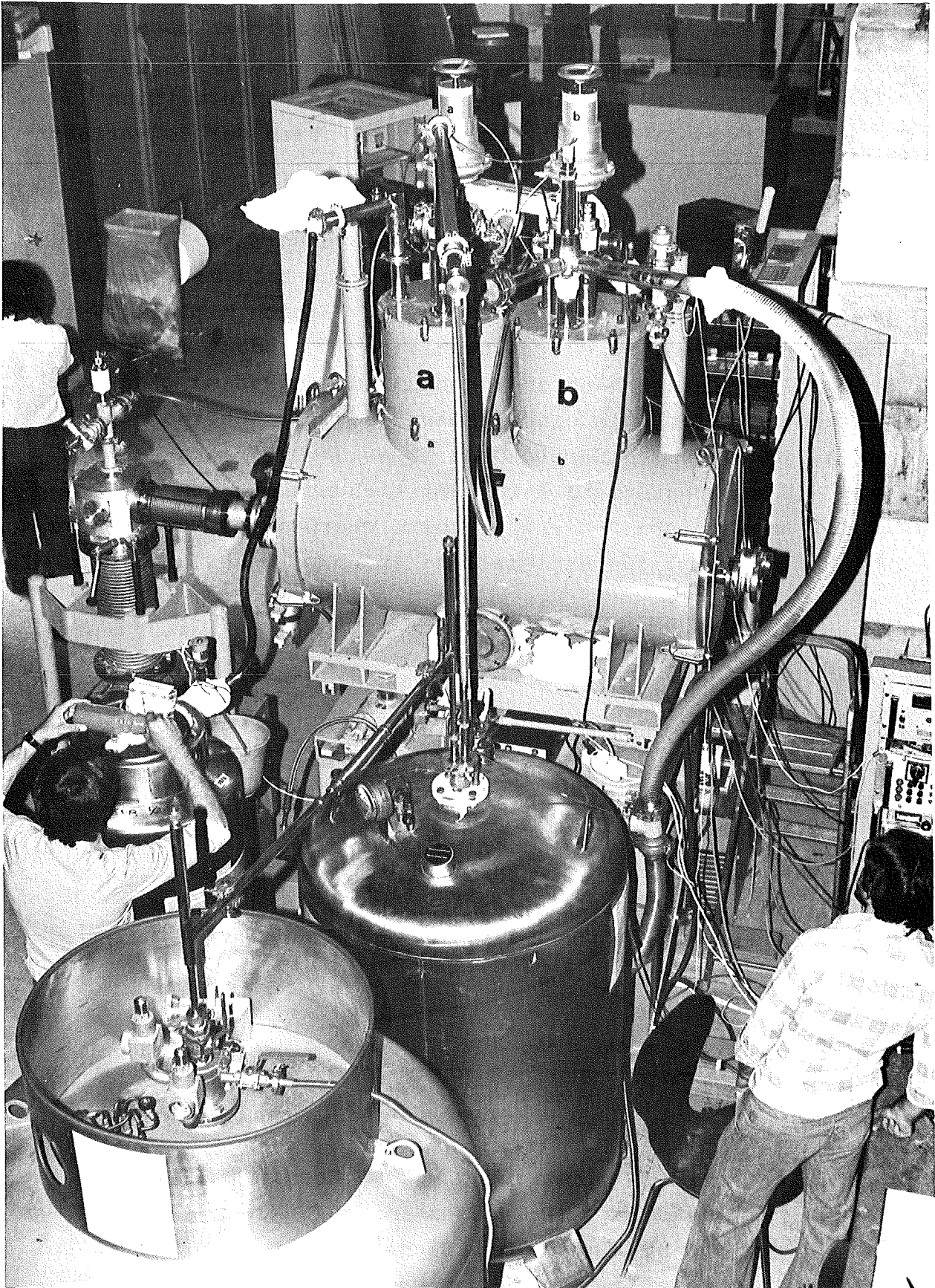


Abb. 1: Supraleitende Ionen-Nachbeschleunigungsteststrecke

bzw. haben die Entstehung weiterer, umfangreicher apparativer Entwicklungen wie z.B. Magnetspektrometer, großflächiger Detektorsysteme und Flugzeitapparaturen beeinflusst. Eine Reihe von Tandemlabors hat sich so zu Zentren der Schwerionenphysik entwickelt.

Die Begrenzung der Terminalspannung der ursprünglichen MP-Maschine auf Werte unter 10 MV erwies sich bald mehr und mehr als Hindernis, mit Experimenten in den Bereich mittelschwerer Ionen vorzustößen. So mußten sämtliche 10 Tandems dieser Kategorie in den letzten Jahren sogenannten "Upgradingprogrammen" ⁸ unterzogen werden, die eine Erhöhung der Terminalspannung U_T von ca. 10 MV in den Bereich von 12 - 13 MV erbrachten. Mit Ionen bis zur Massenzahl $A \sim 20$ läßt sich nun mit dem MP-Tandem die Coloumbbarriere schwerster Kerne überwinden, für schwerere Projektile reicht die durchfallene Spannung nicht aus (Abb. 2).

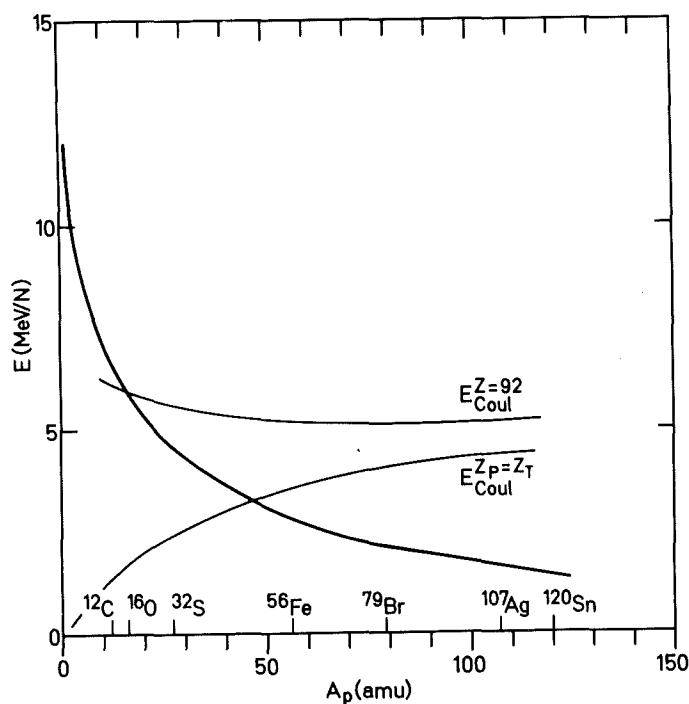


Abb. 2: Endenergien eines auf $U_T=12$ MV Terminalspannung "ungegradeten" MP-Tandems in MeV/Nukleon als Funktion der Projekttilmasse A_p . Eingezeichnet sind ferner die Coloumbwälle für $A_p \rightarrow$ Uran und $A_p = A_T$. (A_T = Targetmasse)

In den Jahren 1972 bis 1976 vorgelegte Untersuchungen^{1,9,10} kamen zu dem Ergebnis, daß eine Erhöhung der Ionenenergie auf etwa 6 MeV/N bis zur Massenzahl $A \sim 80$ ein weites Feld von experimentellen Möglichkeiten erschließen würde, ohne damit das Gebiet schwerster Projektile zu berühren, in den existierende Großbeschleuniger (z.B. Unilac) günstigere Betriebs- und Experimentierbedingungen bieten.

Eine weitere Erhöhung der Terminalspannung scheint bei der vorhandenen MP-Maschine mit der vorgegebenen Tank- und Säulengeometrie sowie beim derzeitigen Stand der Technologie der Beschleunigungsröhren nicht möglich zu sein. Die angestrebte Erhöhung der Energie kann somit nur unter Einsatz eines Nachbeschleunigers erreicht werden, der die nach dem MP-Tandem in einem zweiten Stripper auf höheren Ladungszustand gebrachten Ionen weiter beschleunigt. Obwohl prinzipiell auch Zyklotrons und elektrostatische Maschinen als Nachbeschleuniger geeignet sind, werden in der überwiegenden Mehrheit der in Planung oder Bau befindlichen Beschleunigerprojekte Hochfrequenzlinearbeschleuniger eingesetzt¹¹. Vor allem wegen der geringen Investitionskosten und der modularen Ausführbarkeit dieser Maschinen besitzen die Linearbeschleuniger die größte Attraktivität.

2.2 Anforderungen an Tandem und Nachbeschleuniger

Aus der Kombination eines Linearbeschleunigers mit einem elektrostatischen Tandem ergeben sich zunächst eine Reihe von Anforderungen an die Tandembeschleunigeranlage selbst:

Die Erzeugung negativer Schwerionen, die möglichst alle Elemente - auch Isotope geringer Häufigkeit - im angestrebten Massenbereich mit Intensitäten von typisch $5 \mu\text{A}$ liefern sollten, ist durch die Entwicklung und die in den letzten Jahren gelungenen Verbesserungen der Sputtering-Ionenquellen^{12, 13, 14} sichergestellt. Die Notwendigkeit, eine reine Gleichstrommaschine mit einem Hochfrequenzbeschleuniger zu verkoppeln, führt

zur Forderung nach einem leistungsfähigen Strahlpulsungssystem, das einen möglichst großen Anteil der Gleichstromintensität - mit speziellen Systemen lassen sich bis zu 80 % realisieren¹⁵ - in die longitudinale Akzeptanz des Nachbeschleunigers komprimiert. Ein Phasenbereich von $\Delta\phi = \pm 5^\circ$ bei einer Betriebsfrequenz von ca. 100 MHz erfordert eine Pulsbreite von $\Delta t_p \sim 250$ ps, ein Wert, der für ^{32}S Strahlen von 96 MeV mit $\Delta t_p = 70$ ps schon weit unterschritten wurde¹⁶. Damit sich diese für die Anpassung an den Linearbeschleuniger erforderliche Zeitstruktur sicherstellen läßt, ist neben der Verwendung eines isochronen Strahltransportsystems¹⁷ die Optimierung von Art, Dicke und Position der beiden Stripper - Terminal Stripper und Post-Tandem Stripper - notwendig. Energiestraggling und Winkelstraggling beim Durchgang der Ionen durch Gaskanal oder Folie sind die longitudinale und transversale Strahlqualität nachhaltig beeinflussenden Mechanismen¹⁸. Eine Erweiterung des Massenbereiches bis $A \sim 80$ erfordert ferner beim Vakuumsystem des Tandems und der Strahlführung Verbesserungen, die zur Vermeidung von größeren Umladeverlusten als etwa 5 % ein Hochvakuum von besser $5 \cdot 10^{-7}$ Torr gewährleisten müssen.

Die wesentlichen Anforderungen an den Nachbeschleuniger betreffen den Energiegewinn, der für einen breiten Massenbereich ($A_p = 12 - 80$) zum Überwinden der Coulombbarrieren ausreichen soll, und die Erhaltung der ausgezeichneten Strahlqualität des MP-Tandems.

Die für die Nachbeschleunigung der schwersten vorgesehenen Ionen über die Coulombbarriere (Abb. 2) erforderliche effektiv durchfallene Spannung hängt bei vorgegebener Terminalspannung ausschließlich von der Auswahl der Ladungszustände in den beiden Strippern ab. Da das zweimalige Strippen bereits bei den häufigsten Ladungszuständen eine erhebliche Verminderung der letztlich verfügbaren Strahlintensität mit sich bringt (Abb. 3), können höhere Ladungszustände nur dort ausgewählt werden, wo eine Erniedrigung der Intensität zugunsten der Endenergie tolerierbar ist¹⁹.

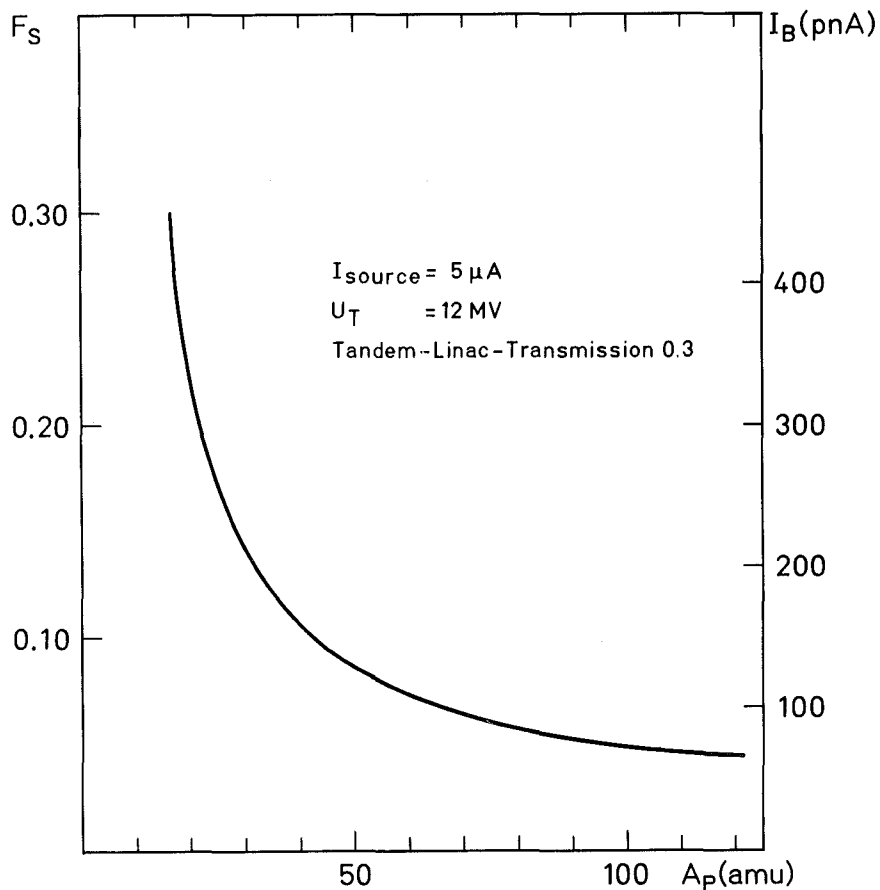


Abb. 3: Bruchteil F_s der vom MP-Tandem transmittierten Intensität, der nach zweimaligem Strippen in den Nachbeschleuniger eingeschossen werden kann. I_B ist der verfügbare Strom bei Auswahl des häufigsten Ladungszustandes in beiden Strippern.

Die zur Beschleunigung von ^{79}Br über die Coulombschwelle erforderliche durchfallene Spannung liegt für verschiedene Ladungszustände ($Q_2 = 20^+ \dots 26^+$) im Bereich von 13 bis 20 MV. In der Studie¹ wurde ein Wert von 13 MV zugrundegelegt.

Als Minimalversion wird in Kap. 4 eine verkürzte Nachbeschleunigungsstrecke mit 9 - 10 MV durchfallener Spannung entworfen. Damit wird immerhin ein Massenbereich bis ca. $A_p = 40$ erschlossen (z.B. wird ^{40}Ca mit 10 MV bei voller Intensität auf 6 MeV/N gebracht).

Da ein erheblicher Teil der Schwerionenexperimente Koinzidenzexperimente sind, ist es wesentlich, daß die Beschleunigungsspannung bis zu möglichst hohen Werten als Dauerstrichspannung (CW) zur Verfügung steht.

Da die vom Nachbeschleuniger angebotene Spannung über einen breiten Massenbereich bei unterschiedlichen Ladungszuständen und auch bei geänderter Terminalspeisung des MP-Tandems möglichst voll nutzbar sein sollte, ist eine flexible Beschleunigungsstruktur erforderlich. Diese Flexibilität kann nur durch kurze Resonatoren wie z.B. Wendel-, Split Ring- und Spiralresonatoren erreicht werden, deren wirksame Beschleunigungsspannung nur schwach von der Teilchengeschwindigkeit abhängt. Zur Anpassung an die Teilchengeschwindigkeit müssen die Sollphasen der einzelnen Resonatoren unabhängig voneinander einstellbar sein, wodurch gleichzeitig auch die Endenergie kontinuierlich verändert werden kann.

Die zweite wesentliche Anforderung an den Nachbeschleuniger bezieht sich auf die Strahlqualität: Die Kombination Tandem-Linearbeschleuniger muß die ausgezeichnete Strahlqualität des MP-Tandems mit einer radialen Emittanz $E_r \sim 5 \text{ mm mrad}$ und einer Energieschärfe $\Delta W/W \sim 2 \cdot 10^{-4}$ weitgehend erhalten. Dies sind die Hauptgesichtspunkte für eine Festlegung der Fokussierung im Nachbeschleuniger (siehe Kap. 4.2) sowie der Amplituden- und Phasenstabilität der einzelnen Resonatoren (siehe Kap. 3.1.2).

3. Experimentelle Vorarbeiten

Mit dem Ziel, zuverlässige Ausgangsinformationen für den Entwurf eines supraleitenden Nachbeschleunigers für die in Kap. 2.2 beschriebenen Anforderungen zu liefern, wurde eine kurze Nachbeschleunigerstrecke gebaut und im Schwerionenstrahl des MP-Tandems getestet. Diese Teststrecke bestand aus einem Kryostaten mit Strahlrohranschlüssen, zwei Niob-Wendelresonatoren, zwei Hf-Speisungs- und Stabilisierungssystemen und dem zugehörigen Kryo- und Vakuumeinrichtungen.²⁰

Komponentenentwicklung und Vorversuche hierzu werden im folgenden Kap. 3.1 beschrieben, während Strahlexperimente in Kap. 3.2 wiedergegeben sind. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Betriebserfahrungen stellt Kap. 3.3 dar.

3.1 Die SNB - Teststrecke

3.1.1 Resonatoren

Wahl der Resonatorparameter

Ausgangspunkt der Überlegungen waren die positiven Erfahrungen, die im IEKP an kurzen supraleitenden Wendelresonatoren aus Niob gesammelt worden waren. Während der Bauzeit der Probestrecke wurden weitere Typen von supraleitenden Strukturen (z.B. Split Ring) mit größerer Beschleunigungsleistung für Schwerionen vorgeschlagen^{21,22}. Wegen der erforderlichen Entwicklungszeit kamen diese Strukturen für die Probestrecke nicht mehr in Betracht.

Bei den Parameterstudien für kurze Wendelstrukturen wurden alternativ $\lambda/2$ -Resonatoren mit Resonanzfrequenzen von 54 und 108 MHz unter Berücksichtigung folgender Kriterien untersucht.

1. Die Resonatorfrequenz sollte ein Vielfaches der Grundfrequenz (6.78 MHz) des am MP-Tandem installierten Pulsungssystems sein.
2. Eine Kette von gleichen Resonatoren sollte Ionen der Massenzahlen von $A = 12$ bis 80 mit möglichst gleichbleibend hoher durchfallener Spannung beschleunigen.
3. Als Optimierungsansatz wurde gefordert, daß die zur Beschleunigung von $^{79}\text{Br}^{26+}$ von einer Einschußenergie von 1.77 MeV/N auf eine Endenergie von 6 MeV/N erforderliche Anzahl gleicher Resonatoren minimal sein sollte.
4. Eine Modulation der Resonanzfrequenz durch Erschütterungen sollte möglichst klein gehalten werden.

5. Um Elektroneneinflüsse auf die Resonatoreigenschaften zu vermeiden, sollte eine elektrische Feldstärke von $E_{\max} = 16 \text{ MV/m}$ an der Wendeloberfläche im Dauerbetrieb nicht überschritten werden.
6. Die Resonatoren sollten möglichst einfach gefertigt werden können.
7. Die Abmessungen der Resonatoren sollten möglichst klein sein, um die Handhabung bei der Fertigung und besonders während der anschließenden Präparationsschritte (siehe Absatz Oberflächenbehandlung) zu erleichtern.

Die Kriterien 2, 6, 7 und besonders 4 führten zur Entscheidung für den 108-MHz-Resonator, obwohl die durchfallene Spannung eines 54-MHz-Resonators etwa 1,5-fach höher gewesen wäre und somit eine geringe Anzahl von Einheiten bedeutet hätte.

Um die günstigsten Parameter zu ermitteln, wurde zunächst mit einem modifizierten Schichtmodell^{23, 24} das beschleunigende Achsenfeld E_{TW} im Verhältnis zum maximalen elektrischen Oberflächenfeld E_{\max} optimiert. Diese Rechnungen gelten nur für unendlich lange Wendeln, da keine Endeffekte berücksichtigt werden. Um den Einfluß der Endeffekte auf das Achsenfeld zu berücksichtigen, wurden Resonatormodelle gebaut, wobei die aus dem modifizierten Schichtmodell ermittelten Werte als Ausgangsparameter dienten. An den Modellen wurde das elektrische Achsenfeld nach der Störkörpermethode gemessen und daraus wurde der Transittimefaktor in Abhängigkeit von der Ionenenergie ermittelt²⁵. Unter Berücksichtigung dieser experimentellen Werte wurden die Wendelparameter schrittweise so verändert, daß die zur Beschleunigung von $^{79}\text{Br}^{26+}$ von 1.77 MeV/N auf 6 MeV/N erforderliche Anzahl von Resonatoren minimal wurde.

Tabelle I enthält die Parameter eines auf diese Weise optimierten $\lambda/2$ -Wendelresonators bei 108.48 MHz. Der Durchmesser des Wendelrohres beträgt 1.0 cm. Der Resonator hat eine Gesamtlänge

von etwa 29 cm. Das magnetische Oberflächenfeld erreicht beim Sollfeld maximal 62 mT. Das Sollfeld wird durch ein maximales elektrisches Oberflächenfeld $E_{\max} = 16 \text{ MV/m}$ definiert. Die endgültige Windungszahl ergab sich beim Einstellen der Resonanzfrequenz.

Tab. I: Optimale Parameter für einen $\lambda/2$ -Wendelresonator bei 108.48 MHz zur Beschleunigung schwerer Ionen

Wendeldurchmesser	64.8 mm
Steigung der Wendel	16.5 mm
Wendellänge	163.2 mm
Resonatorlänge (Flansch-Flansch)	296 mm
bei Sollfeld:	
Blindleistung PQ	$117 \times 10^6 \text{ VA}$
maximal durchfallene Spannung bei optimaler Einschußphase ($\beta=12\%$)	312 kV
statische Frequenzver- schiebung	26 kHz

Um eine Überhöhung der elektrischen Oberflächenfelder zu vermeiden, wurde der Durchmesser des Außentanks zu 15 cm (etwa 2.3 x Durchmesser der Wendel) und der Abstand Wendel/Enddeckel etwa gleich einem Wendelradius gewählt. In Abb. 4 ist ein solcher Resonator schematisch dargestellt.

Der Resonator zeichnet sich durch besonders geringe Abmessungen quer zur Strahlachse und ein geringes Volumen aus. Diese Eigenschaften wirken sich günstig auf die Herstellung der Resonatoren und die Oberflächenpräparation aus und erleichtern die Montage und Justierung der Resonatoren im Krvestaten.

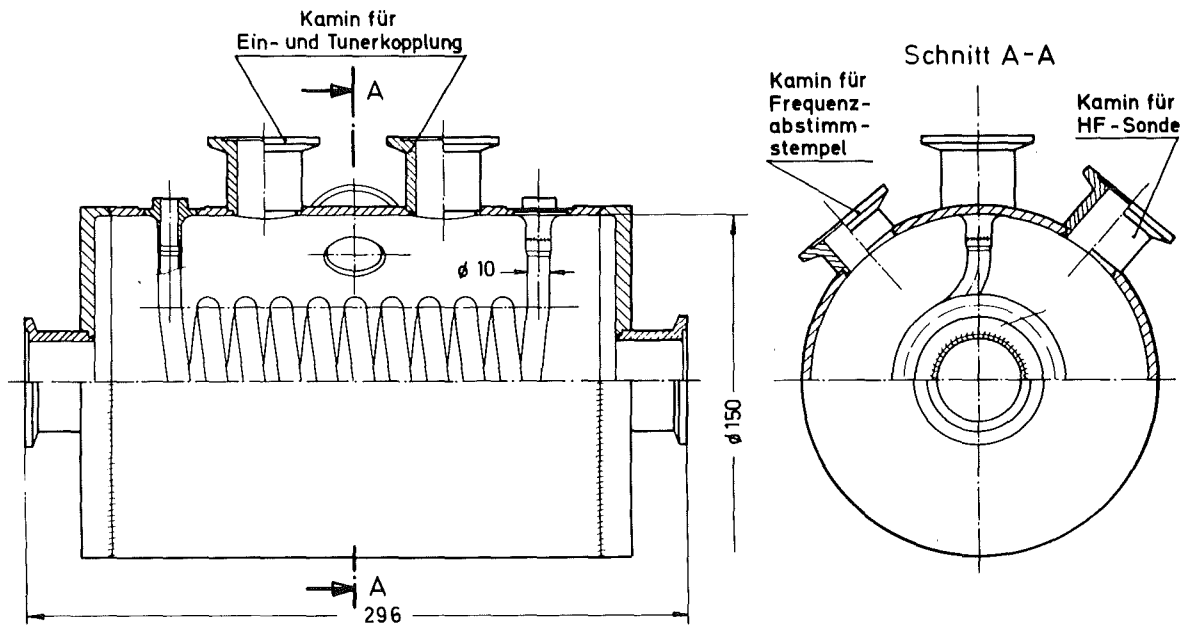


Abb. 4: Schematische Darstellung des $\lambda/2$ -Wendelresonators

Fertigung der Testresonatoren

Insgesamt wurden drei $\lambda/2$ -Wendelresonatoren gleicher Geometrie (Abb. 4) hergestellt.²⁶ Die Wendel wurde jeweils aus einem 10 x 1 mm Nb-Rohr gewickelt und in einen aus Nb-Blech gerollten Außentank eingeschweißt. Alle Schweißungen wurden nach dem WIG-Verfahren (Schutzgasschweißung) durchgeführt. Dadurch konnten die Fertigungskosten gegenüber dem bisher benutzten Elektronenstrahlschweißverfahren stark reduziert werden. Auf eine ganzzahlige Windungszahl der Wendel wurde verzichtet, vielmehr

wurde die gewünschte Resonanzfrequenz durch ein schrittweises Zurückbiegen der Wendelstützen und Messen der Eigenfrequenz in einem Modellaußentank eingestellt. Der verbleibende Frequenzfehler von weniger als ± 100 kHz konnte durch einen Nb-Stempel, der in den Resonator hineinragt, korrigiert werden. Um Erfahrungen für eine industrielle Serienfertigung zu bekommen, wurde ein Resonator vollständig bei der Firma WC Heraeus/Hanau hergestellt.²⁷ Im IEKP wurden lediglich die Oberflächenbehandlung und das Einstellen der Frequenz durchgeführt. Die erzielten Meßergebnisse sind mit denen der anderen Resonatoren vergleichbar²⁶.

Oberflächenbehandlung und Konditionierung

Die Oberflächenpräparation der Wendelresonatoren erfolgte mit den üblichen Methoden: Elektropolieren, chemisches Polieren, Oxypolieren und Ausheizen in einem Hochvakuumofen. Beim Elektropolieren und beim chemischen Polieren werden von der Oberfläche Schichten bis größenordnungsmäßig $100 \mu\text{m}$ abgetragen. Das Oxypolieren dient zum Abtragen einer Oberflächenschicht von nur $0.1 \mu\text{m}$. Das Ausheizen erfolgte im Hochvakuumofen bei Temperaturen $T \approx 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ und einem Druck $p \leq 10^{-6}$ Torr jeweils etwa 2 h lang. Dabei werden Spannungen aus dem Material sowie der beim Elektropolieren im Niob gelöster Wasserstoff entfernt.

Für eine Serienfertigung werden folgende Behandlungsschritte vorgeschlagen:

Die gewickelte Wendel wird mit dem Wickeldorn spannungsfrei gegläht und anschließend in ihre endgültige Form gebogen. Danach werden von der Wendeloberfläche elektrolytisch etwa $100 \mu\text{m}$ abgetragen. Von den anderen Teilen des Resonators werden ebenfalls etwa $100 \mu\text{m}$ von der Oberfläche entfernt. Da diese Teile keinen hohen Feldern ausgesetzt sind, empfiehlt sich dafür das schnellere aber schlechter kontrollierbare Verfahren des chemischen Polierens. Der zusammengeschweißte Resonator wird weitere 50 bis $60 \mu\text{m}$ elektropoliert und anschließend ausgeheizt. Nachdem ein Resonator

einmal hohe Hf-Felder erreicht hat, genügt es nach Verschlechterungen der Hf-Eigenschaften, etwa durch Verschmutzung der Oberfläche, den Resonator zu oxypolieren.

Nach Abschluß der Oberflächenpräparation werden die Resonatoren mit Methanol gespült und unter staubarmen Bedingungen aneinandergefügt. Anschließend wird evakuiert, und die beiderseitigen Strahlöffnungen werden mit Stopfen verschlossen. Nach Einsetzen der Resonatorenreihe in den Kryostat können die Stopfen durch Schleusen unter Vakuum gezogen werden, so daß eine weitere Belüftung der Resonatoren entfällt.

Bei der Inbetriebnahme nach einer Oberflächenpräparation werden die Resonatoren konditioniert, um durch Elektronen hervorgerufene Begrenzungen der Feldstärke zu überwinden. Die bei kleinen Feldstärken ($E_{\max} \sim 0.1$ MV/m) zunächst vorhandenen Schwellen (multi-pacting) verschwinden nach kurzer Hochfrequenzbetriebszeit und treten im weiteren Betrieb nicht mehr auf. Begrenzungen bei hohen Feldstärken ($E_{\max} > 10$ MV/m) lassen sich durch Konditionieren der Resonatoren unter verdünnter He-Atmosphäre²⁶ zu höheren Feldwerten verschieben.

Auch nach einer Kontamination (vgl. Kap. 3.3) führt dieses Konditionierungsverfahren zu einer Erhöhung der erreichbaren Feldstärken. Der Zeitaufwand für das Konditionieren liegt zwischen wenigen Minuten und einigen Stunden.

Hochfrequenzkopplungen

Jeder Resonator enthält 3 kapazitive Hf-Kopplungen. Die Hf-Einkopplung und die Kopplung für den elektronischen Tuner bilden supraleitende Nb-Stifte, die über je eine Kühlkammer mit Helium gekühlt wurden. Auf eine Optimierung der zur Tieftemperatur abgeführten Wärme mußte verzichtet werden, da die notwendigen Parameter (z.B. Dimensionierung des elektronischen Frequenzstellers, siehe Kap. 3.1.2) zunächst nicht festlagen.

Abb. 5 zeigt einen der verwendeten Resonatoren mit montierten He-Kühlkammern. Die Hf-Auskoppelsonde bildet ein normalleitender Cu-Stift.

Frequenzkorrektur

Zur Frequenzabstimmung bei He-Temperaturen dient ein beweglicher supraleitender Nb-Stempel, der in den Resonator hineinragt. Mit der Ausgangsposition des Stempels werden Fertigungstoleranzen in der Resonanzfrequenz ausgeglichen. Der Abstimmbereich des Stempels reicht trotz der statischen Frequenzverschiebung von typisch 30 kHz bei Sollfeld aus, um einen synchronen Betrieb mehrerer Resonatoren bei unterschiedlichen Feldpegeln zu ermöglichen. Ein durch Getriebemotor bewegter Nb-Stempel (Abb. 6), der über einen Nb-Membranball an den Resonator angeflanscht wird, wurde im Laborexperiment erfolgreich getestet.^{2, 28}

Bei einer Ausgangsverstimmung von 50 kHz und einem Stellbereich von 55 kHz zeigte sich kein Einfluß auf die erreichbaren Feldstärken.

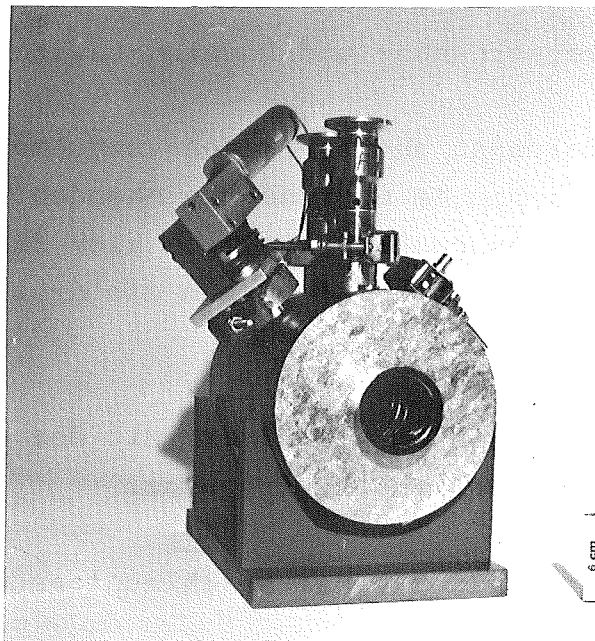


Abb. 5: Kompletter Nb-Wendelresonator mit zwei aufgesetzten Koppel-
leitungskühlkammern (oben), der Auskoppelsonde (rechts)
und dem angeflanschten Frequenzkorrekturstempelantrieb
(links).

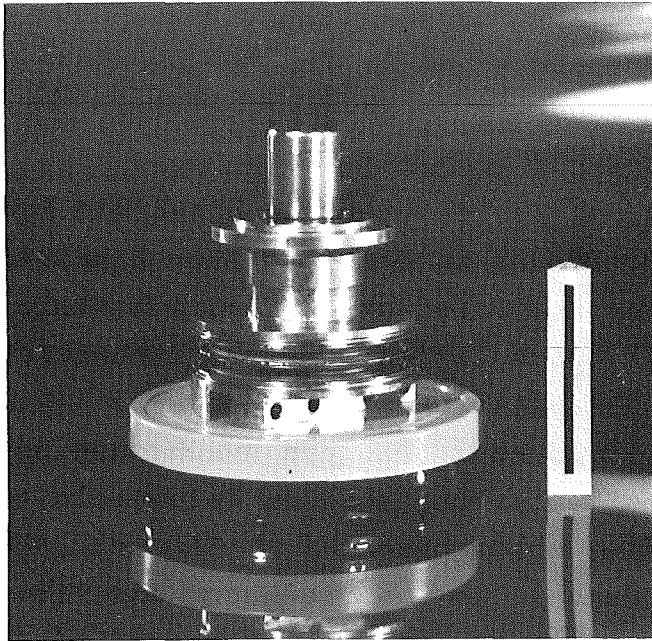


Abb. 6: Nb-Stempel mit Nb-Membranbalg zur Frequenzkorrektur

3.1.2 Hochfrequenzversorgungs- und Regelungssystem

Aufgrund der Anforderungen an die Phasen- und Amplitudenstabilität (Kap. 2.2) und der hierzu im Gegensatz stehenden Frequenzinstabilität³¹ der benutzten Resonatoren stellten sich für jeden einzelnen Resonator erforderliche Hf-System die drei nachfolgenden Hauptaufgaben:

- a) Speisen des supraleitenden Resonators mit der erforderlichen Hf-Leistung bei seiner Resonanzfrequenz.
- b) Stabilisieren der Amplitude der beschleunigenden Hf-Spannung
- c) Synchronisieren der Phase der beschleunigenden Hf-Spannung

Die getrennte Erfüllung dieser Aufgaben hat sich bereits bei einem früher für den supraleitenden Protonenlinearbeschleuniger entwickelten Hf-System³² bewährt. Entsprechend ist auch hier

das Hf-System in folgende drei Schleifen gegliedert (Abb. 7)

- a) eine selbsterregte Hf-Rückkopplungsschleife, in der der Resonator frequenzbestimmend ist. Dadurch wird die Speisung des extrem schmalbandigen Resonators trotz der durch Feldkräfte bewirkten Selbstverstimmung ermöglicht.
- b) eine Amplituden-Regelschleife, die Amplitudenfehler auf $< 1\%$ beschränkt.
- c) eine Phasen-Regelschleife, die mittels eines schnellen, elektronisch gesteuerten Abstimmelements³³ die durch mechanische Umwelteinflüsse (Vibrationen) bewirkten Frequenzschwankungen ausregelt, so daß eine starre Phasenbeziehung (Synchronisation) zu einem gemeinsamen Referenzoszillator und somit zwischen den einzelnen Resonatoren eingehalten werden kann³⁴. Dabei ist eine Phasenabweichung $< 1^\circ$ zulässig.

Eine zusätzliche Störaufschaltung, die von der Phasenregelschleife auf die Amplitudenregelschleife einwirkt, ermöglicht es, die ponderomotorische Instabilität³¹ des supraleitenden Wendelresonators zu kompensieren. Hierdurch erreicht man eine Dämpfung solcher Frequenzschwankungen, die durch mechanische Wendelresonatoren überhöht sind.

Für die Teststrecke wurden zwei Hf-Systeme nach Abb. 7 aufgebaut. Die einzuspeisende Hf-Leistung wurde jeweils von einem Breitbandverstärker mit 100 W Ausgangsleistung aufgebracht. Das Hf-System, dessen Regeleinschübe zusammen mit dem Frequenzstellglied in Abb. 8 gezeigt sind, hat eine Netzanschlußleistung von < 1 kW.

Um den gleichzeitigen Betrieb einer Anzahl von Beschleunigungsresonatoren (siehe Kap. 4) zu erleichtern, ist eine Automatisierung der Bedienungsfunktionen erforderlich. Die Amplitudenschleife, in der ein PIN-Dioden-Modulator³⁵ als Stellglied

dient, wurde durch eine Inbetriebnahmeautomatik, eine Stellbereichsautomatik, eine Stellbereichsüberwachung und durch eine digitale Amplitudensollwerteingabe in die Betriebsautomatisierung einbezogen³⁶.

Hochfrequenz - Regelungssystem

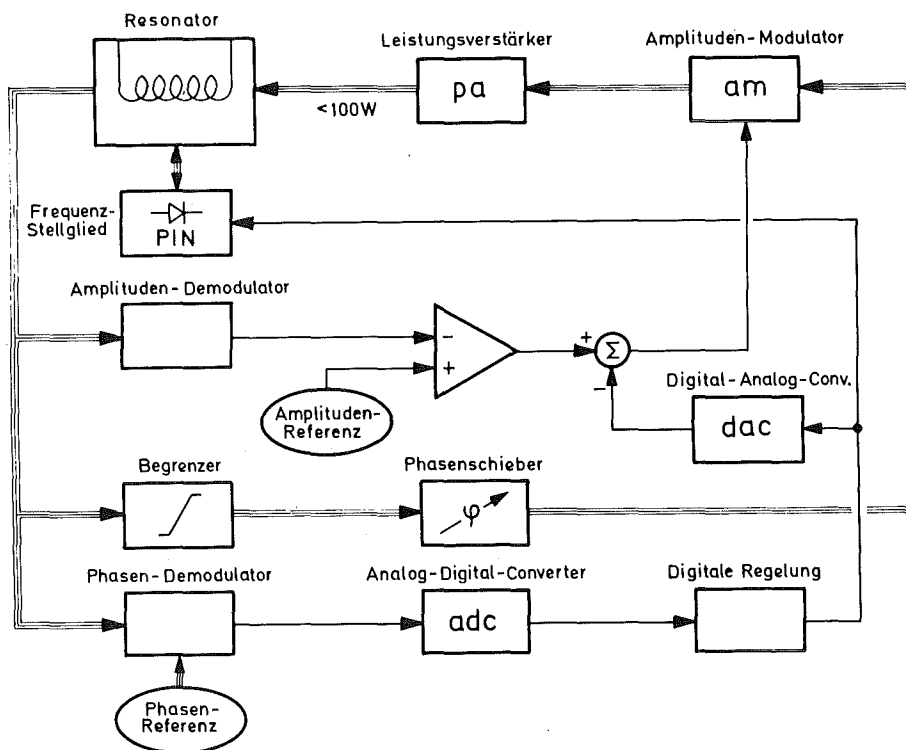


Abb. 7: Hochfrequenz-Regelungssystem

Die Phasenregelschleife benutzt eine in 6 Schritten mittels PIN-Dioden schaltbare Reaktanzanordnung außerhalb des Kryostaten als Frequenzstellglied³⁷. Dieses wurde zunächst für einen Stellbereich von 2 kHz ausgelegt, der nach ersten Betriebserfahrungen am endgültigen Aufstellungsort auf 1,36 kHz verkleinert wurde. Auch dieser Stellbereich wurde bei wirksamer Störaufschaltung nur teilweise ausgenutzt.

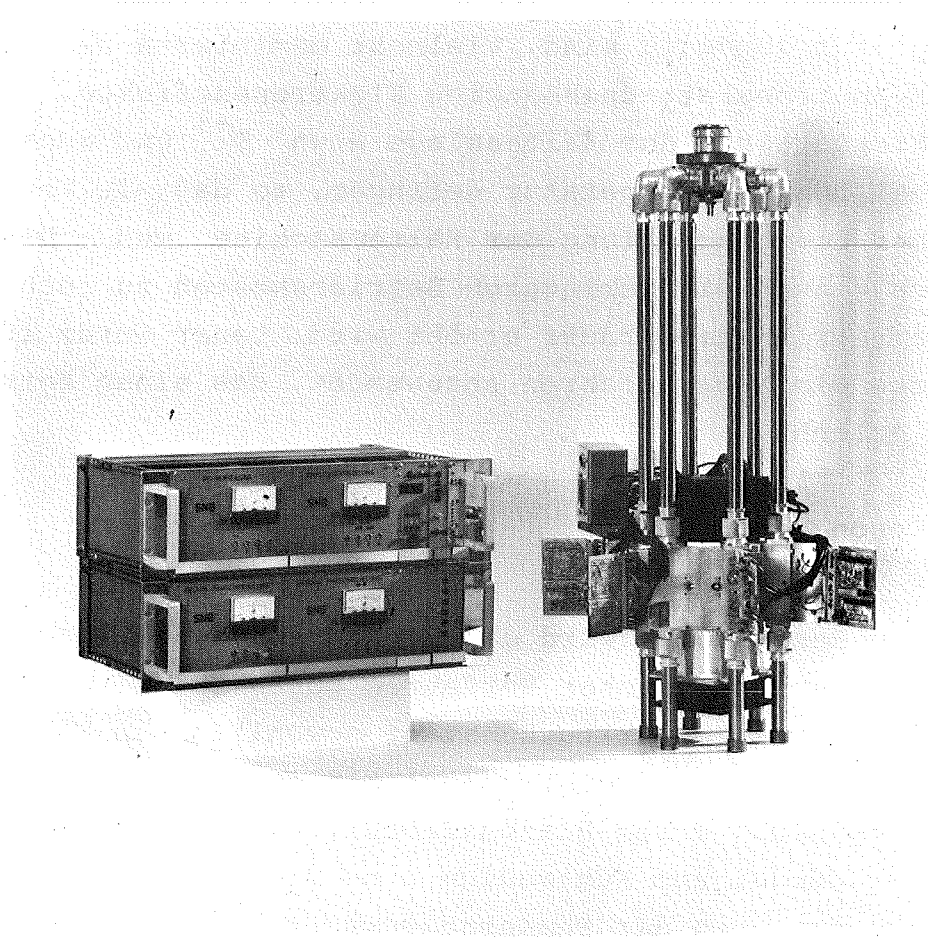


Abb. 8: Regelungselektronik (links) und elektronisches Frequenzstellglied (rechts)

3.1.3 Kryosystem

Die Versuche an mehreren Einzelwendelresonatoren zeigten, daß die Tieftemperaturverluste im Bereich 4.2 bis 1.8 K nur wenig von der Temperatur abhängig sind. Vielmehr dominieren bei Feldstärke ≥ 16 MV/m temperaturunabhängige Elektroneneffekte. Nun ist der Wirkungsgrad der Kälteanlage etwa $\sim T^{-1}$ und auch ihre Komplexität bei höherer Temperatur geringer, so daß mit Verebilligungen bei der Anschaffung der Kältemaschine und - über den Stromverbrauch - auch mit geringeren Betriebskosten zu rechnen ist, wenn die Betriebstemperatur erhöht wird. Daher wurde für die Teststrecke ein Kühlverfahren angewendet, das einen Betrieb bei ~ 4.4 K erlaubt.

Kühlung der Resonatoren

Zur Kühlung der Resonatoren wird die Verdampfungsenthalpie des flüssigen He ausgenutzt. Dieses Verfahren gestattet eine Wärmeübertragung bei hoher Temperaturkonstanz sowohl in den Kühlkanälen (turbulente Zweiphasenströmung) als auch im He-Bad des Kryostaten (Badkühlung durch Blasensieden). Die Wärmestromdichten von der Wendel zum Kühlmedium sind mit einigen 10^{-2} W/cm² sehr gering, so daß auch der Temperaturgradient Wand - Medium nur einige hundertstel K beträgt.

Das in den Kryostaten eintretende He-Flüssigkeits-Dampf-Gemisch wird zunächst durch einen Wärmeaustauscher geleitet, um den Dampfanteil zu kondensieren und die Strömung zu beruhigen. Danach durchläuft das He alternierend Wendelsektion, Kondensator, Wendelsektion usw. und wird in der Teststrecke nach Austritt aus der zweiten Sektion in einem Expansionsventil auf den Baddruck des Kryostaten entspannt. (Abb. 9). Der Durchsatz durch dieses Ventil wird von einer Heliumstandsonde so gesteuert, daß der Heliumstand konstant bleibt. Der Durchsatz durch die Wendeln wird daher durch die gesamten Verdampfungsverluste in der He-Vorlaufleitung, Wendelstrecke und im Kryostaten bestimmt. (Ein Wärmeeinfall von 1 W verdampft bei 4,4 K ca. 1,4 l He/h) Ein hoher Flüssigkeitsanteil innerhalb der Wendeln wird dadurch

gewährleistet, daß der Wärmeeinfall in das Kryostatbad größer als derjenige innerhalb der Wendeln ist. Die zwischen die Resonatoren geschalteten Kondensatoren sorgen zudem dafür, daß der in den Wendeln entstehende Dampf zumindest teilweise rückverflüssigt wird. Durch die Kondensation des Dampfes werden außerdem die Druckverluste in der Wendelstrecke (Innendurchmesser 8 mm) wesentlich erniedrigt^{3 8}.

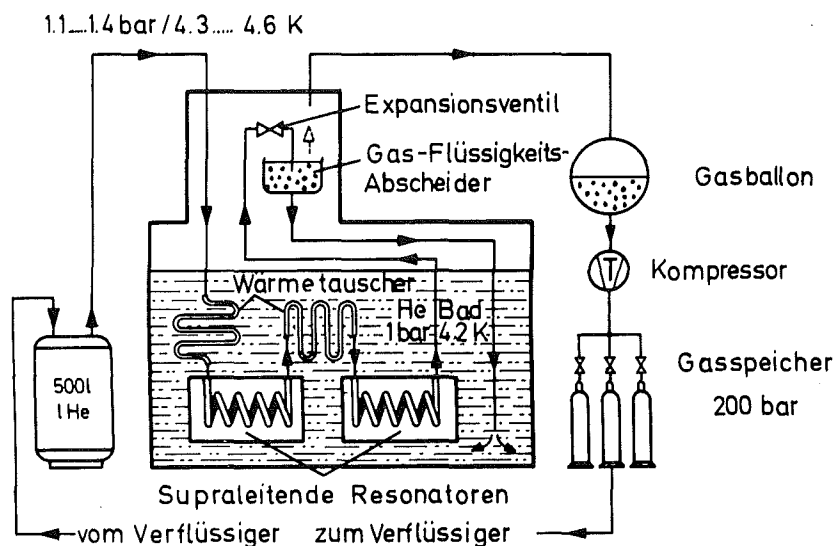


Abb. 9: Kühlt-schema im Testkryostat

Vorexperimente

Das oben beschriebene Kühlverfahren wurde im Prototypkryostaten (Abb. 10) mit einem Resonatormodell und danach mit einem Originalresonator getestet^{2 2}. Die Untersuchungen zeigten, daß stabile Betriebszustände, sowohl bezüglich Durchfluß und Temperaturstabilität als auch bezüglich Frequenzstabilität der Resonatoren selbst bei extrem hohen Dampfgehalten erreicht werden. Die maxi-

male Temperaturerhöhung zwischen Eintritt und Austritt einer Wendel lag bei 90 % Dampfanteil bei nur 0,2 K. Messungen mit einem Mikrofon im Gasraum und einem dynamischen Druckaufnehmer im Zweiphasenbereich zeigten bei Durchsätzen bis zu 4 g/s und Vorlaufdrücken von ca. 1 - 1,6 bar keine Oszillationen im He-Kühlkreis. Es wurden keine Einflüsse auf die Frequenz der Wendelresonatoren festgestellt. Durch diese Experimente wurde demonstriert, daß supraleitende Beschleunigungsstrecken dieser Art mit Vorteil bei ca. 4,4 K, also mit siedenden He I oder He I-Flüssigkeitsdampfgemisch bei leichtem Überdruck gegenüber der Atmosphäre, sicher zu betreiben sind.

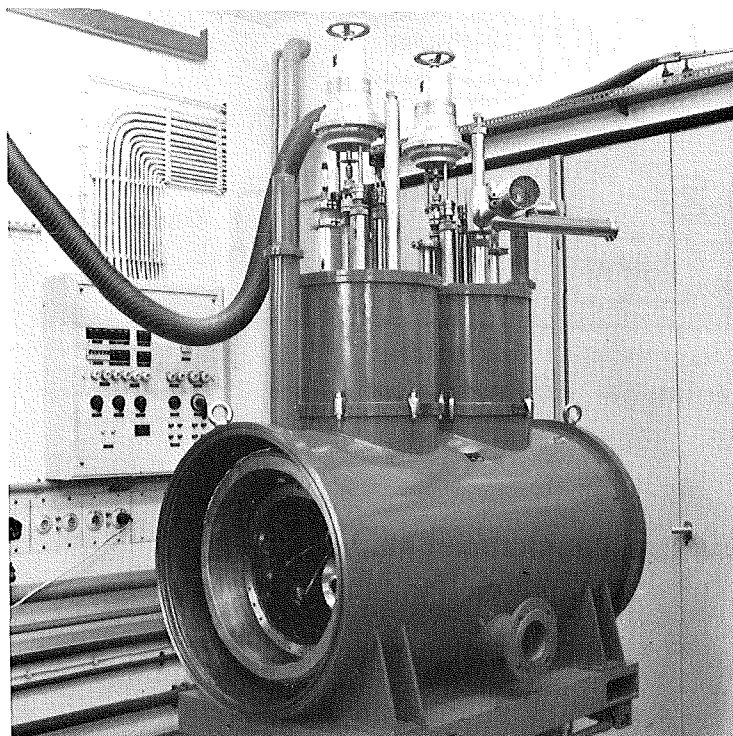


Abb. 10: Testkryostat mit Einbauten

3.2 Strahlexperimente mit der Teststrecke

Nach Fertigstellung der kompletten Teststrecke im IEKP wurde diese ins MPI transportiert und dort am Testaufbau der Nachbeschleunigerinjektion des MP-Tandems in Betrieb genommen. Insgesamt erstreckte sich die Experimentierzeit vom Juni 1976 bis Januar 1977. In Zusammenhang mit den Strahlexperimenten sollten möglichst umfangreiche Erfahrungen über Leistungsfähigkeit und Betriebszuverlässigkeit des in wesentlichen Komponenten repräsentativen Teilstückes eines supraleitenden Nachbeschleunigers gewonnen werden.

3.2.1 Beschleunigungsexperimente

Um die ausgehend von Störkörpermessungen berechnete Beschleunigungsspannung der einzelnen Resonatoren zu verifizieren, wurden Schwefelionen in unterschiedlichen Ladungszuständen und mit verschiedenen Einschußenergien durch die Teststrecke nachbeschleunigt^{2,2}. Der Energiezuwachs entsprach bei Teilchengeschwindigkeiten im Bereich von ca. 6 - 10 % der Lichtgeschwindigkeit den Berechnungen, wie in Abb. 11 für einen Resonator dargestellt. Damit ist auch direkt im Strahlexperiment die relativ breite Geschwindigkeitsakzeptanz der Wendel bestätigt. Bei Beschleunigungen sowohl eines kontinuierlichen wie auch eines gepulsten Strahls ergaben sich keinerlei Anzeichen einer Strahlrückwirkung auf beide phasensynchron bei Sollfeld betriebenen Resonatoren.

3.2.2 Bestrahlungsexperimente

Bislang lagen keine Informationen über die Wirkung von energiereichen schweren Ionen vor, die auf die Oberfläche von Hf-Supraleitern treffen. Lediglich Strahlenschäden, die sich z.B. auf die kritische Temperatur von Gleichstrom-Supraleitern auswirken, waren hinreichend untersucht. Bei Hf-Supraleitern wurden Änderungen in der Metall-Oxyd-Grenzschicht erwartet, die zu zusätzlichen Hf-Verlusten oder zu einer Veränderung der Elektronen-

emissionseigenschaften führen können. Um diese Informationslücke auszufüllen, wurden zwei Bestrahlungsexperimente durchgeführt.^{3,9, 2:}

- a) Ein Resonator wurde in situ bei einer Arbeitstemperatur von 4,4 K bestrahlt. Hierzu wurde ein 100 MeV ^{20+}Ni -Strahl von 1 pn A am Kryostateingang abgelenkt und dabei über eine Fläche von ca. 12 cm^2 der Wendelinnenseite gestreut. Ausgehend von Messungen der Temperaturanstiege am Wendelende wurden sowohl die von der Wendel absorbierte Strahlleistung als auch durch die Bestrahlung bedingte Änderungen der Hf-Verluste abgeschätzt. Nach einer Gesamtdosis von $1,4 \times 10^{14}$ Ionen wurden Änderungen weder in den Supraleitungs-Verlusten noch in der Elektronenemission beobachtet.
- b) Um gleichzeitig definiertere Bestrahlungsbedingungen, eine höhere Dosis und eine höhere Meßauflösung bei der Beobachtung der Supraleitungseigenschaften zu erreichen, wurde Resonator 3 in einem weiteren Experiment einem 99 MeV ^{68}Ni -Strahl bei Raumtemperatur ausgesetzt. Die Supraleitungseigenschaften wurden bei nachfolgenden Messungen in einem Laboraufbau untersucht. Selbst nach einer Bestrahlung mit insgesamt $2,6 \times 10^{15}$ Ionen verteilt über eine Fläche von 12 cm^2 (d.h. $2,2 \times 10^{14}$ Ionen/ cm^2) lag die Änderung der Resonatorverluste im Bereich der Meßunsicherheit. Gleichzeitig wurde keine Beeinträchtigung der Maximalfeldstärke nach der Bestrahlung beobachtet.

Die erwartete Summe jeglicher Teilchenbestrahlung infolge von Streuungen an Blenden oder Restgasen, die ebenfalls nur die Wendelinnenseite erreichen kann, liegt auch bei Langzeitbetrieb eines Beschleunigers mit sinnvoller Blendenwahl bei weitem unter der bei diesen Untersuchungen applizierten Dosis.

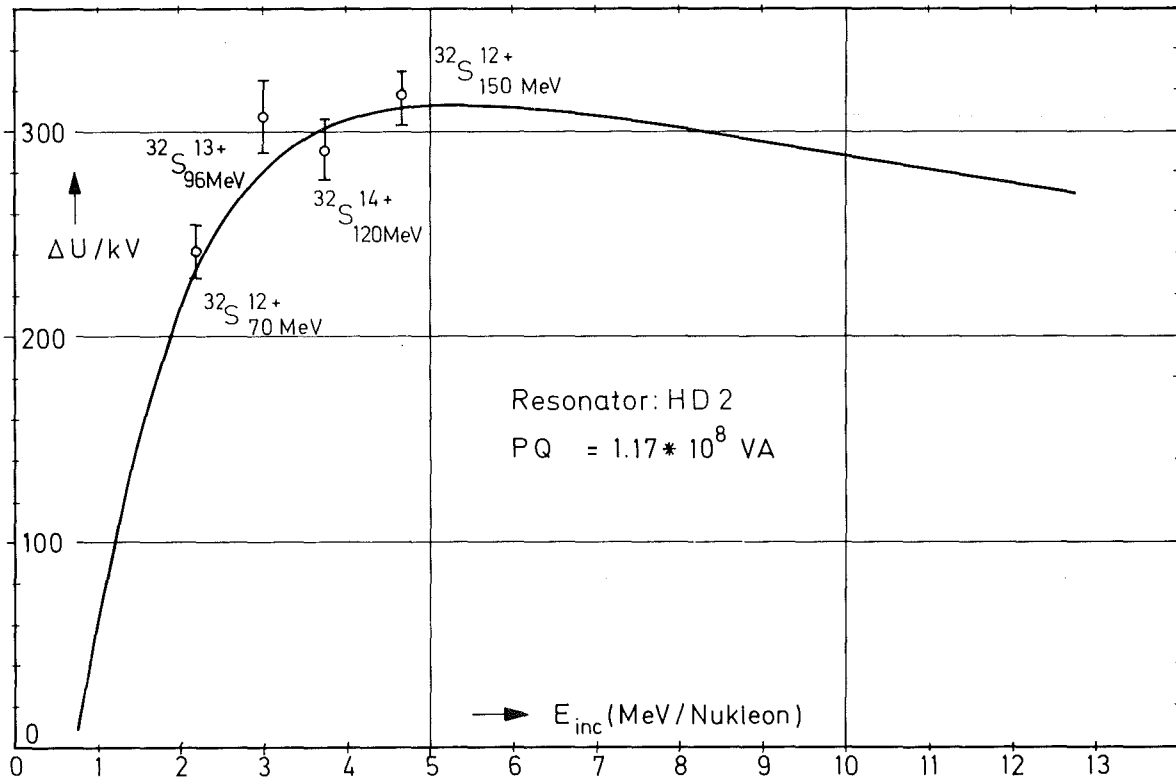


Abb. 11: Die maximale durchfallene Spannung eines Resonators in Abhängigkeit von der Einschussenergie. \circ Meßpunkte Die durchgezogene Kurve wurde aus Störkörpermessungen berechnet.

3.3 Betriebserfahrungen

Um den Umfang der praktischen Erfahrungen zu verdeutlichen, die dem in Kap. 4 folgenden Entwurf eines supraleitenden Nachbeschleunigers zugrunde liegen, sollen zunächst die wichtigsten Betriebserfahrungen mit der Teststrecke zusammengefaßt werden, die während 1000 Kryobetriebsstunden bei 4.4 K - davon 500 h Hochfeldbetrieb mit 200 h Synchronbetrieb beider Resonatoren bei Sollfeld und 40 h Beschleunigungsexperimentierzeit - gewonnen wurden² :

Resonatoren

- a) Alle drei Testresonatoren erreichten nach Abschluß der in Kap. 3.1.1 beschriebenen Oberflächenbehandlung wie vier früher im IEKP gefertigte $\lambda / 2$ Wendelresonatoren^{3 0, 4 0} Oberflächenfeldstärken von 20 bis 30 MV/m und lagen damit sicher über dem Entwurfswert von 16 MV/m. Die erreichbaren Feldstärken waren durch Elektronenemission begrenzt.
- b) Dauerbetrieb über bis zu 300 h bei Sollfeldstärke führten zu keiner Verschlechterung der Resonatoreigenschaften.
- c) Die erwarteten Beschleunigungseigenschaften der Resonatoren konnten experimentell bestätigt werden ($\Delta U = 312$ V pro Resonator).
- d) Die Hf-Verluste in den Resonatoren lagen bei typisch 0.7 Watt, stets jedoch < 1 W.
- e) Häufige Temperaturzyklen zwischen 4,4 K und 300 K beeinträchtigten die Supraleitungseigenschaften nicht.
- f) Bestrahlung einer Teiloberfläche mit einem mehrfachen der im langjährigen Beschleunigerbetrieb zu erwartenden Dosis hinterließ keinen meßbaren Schädigungseffekt.
- g) Schlechte Vakuumbedingungen oder Vakuumzusammenbrüche im Raumtemperaturteil des Strahlrohrsystems erhöhten die Elektronenemissionsrate besonders des angrenzenden Resonators und führten dadurch zu einer Erniedrigung der Maximalfeldstärke, jedoch konnten auch im ungünstigsten Fall noch 80 % der Sollfeldstärke erreicht werden.
- h) Durch eine einfache naßchemische Behandlung (oxipolieren) ist der Ausgangszustand der supraleitenden Oberflächen auch nach starken Kontaminationen reproduzierbar.

Während die unter a - f und h beschriebenen Erfahrungen die Erwartungen in vollem Umfang erfüllten, war die Beeinflussung der Maximalfeldstärken der Resonatoren durch Vakuumzusammenbrüche im angrenzenden warmen Strahlvakuumssystem die einzige gravierende Störung des Betriebs, die daher kommentiert werden soll:

1. In den Laborversuchen wurden diese und ähnliche Resonatoren häufig belüftet, ohne daß ein Einfluß auf die Maximalfeldstärke bemerkt wurde.
2. Es wurden an Laborresonatoren Belüftungsversuche mit gereinigten Gasen durchgeführt⁴⁰, die keine irreversiblen Änderungen der Supraleitungseigenschaften erbrachten.
3. Während der Montagezeiten waren die Resonatoren durch Ventile bzw. Stopfen abgeschlossen. In dieser Zeit stieg der Druck auf Werte $>10^{-3}$ Torr an. Es wurde kein Einfluß auf die nach Konditionieren (Kap. 3.1.1) erreichbare Maximalfeldstärke festgestellt.
4. Eine Schädigung wurde ausschließlich durch Lecks bzw. Pumpenausfälle im angrenzenden "warmen" Strahlvakuumssystem verursacht.
5. Der Enddruck der beiden verwendeten Turbomolekularpumpen von 2×10^{-6} bzw. 10^{-6} Torr reichte nur knapp aus.
6. Ein verunreinigter Resonator konnte durch Spülen mit Methanol vollständig regeneriert werden.

Aus diesen Beobachtungen muß geschlossen werden, daß die Verunreinigungen durch Staub oder Öldämpfe verursacht wurden. Während der begrenzten Versuchszeit konnte das Vakuumssystem nicht mehr gegen eine saubere und störere Anordnung ausgetauscht werden. Bei der Planung des Vakuumsystems für den SNB wurde hingegen für eine schnelle Abtrennung des Strahlvakuum in Störfällen gesorgt. (Kap. 4.4.1)

Hf-System

- a) Das Dreifachregelungssystem mit Amplitudenstöraufschaltung arbeitete stabil. Mechanische Anregungen wurden ausreichend bedämpft, selbst Hammerschläge gegen den Kryostaten störten die Synchronisation nicht.
- b) Die Kurzzeitschwankungen der Resonatorfelder blieben unter $\pm 0,2 \%$ in der Amplitude und unter $\pm 0,45^\circ$ in der Phase.
- c) Die beobachteten Langzeitschwankungen waren auf Temperaturabhängigkeit der benutzten Meßstellen zurückzuführen.
- d) Der Stellbereich der elektronischen Frequenzstellglieder von 1,36 kHz wurde bei einem typischen Frequenzmodulationshub von 200 - 500 Hz Spitze-Spitze nur teilweise ausgenutzt.
- e) Die Ausgangsleistung der Hf-Verstärker von 100 Watt reicht bei voller Ausnutzung des Frequenzstellbereichs bis zu 10 % über Sollfeldstärke aus.
- f) Die automatische Inbetriebnahme und Überwachung des Hf-Systems wurde in Zusammenwirken mit dem digital gesteuerten Amplitudensollwert selbsttätig und betriebssicher bewältigt.

Kryosystem

- a) Die Verluste im Prototypkryostat betragen ohne Hochfrequenzeinspeisung in kontinuierlichem Betrieb bei konstantem Heliumpegel 4 W, bei Betrieb beider Resonatoren bei Sollbedingungen typisch 8 W.
- b) Eine Rückwirkung der Heizstrecken aufeinander konnte auch bei Zusammenbruch der Feldstärke in einem Resonator, bei dem ein Wärmepuls von ca. 0,15 Ws entsteht, nicht festgestellt werden.

- c) der Druckabfall über die gesamte Strecke einschließlich Heber betrug < 50 mbar. Bei dieser Druckdifferenz konnte noch der notwendige Durchsatz erreicht werden.
- d) Druckinstabilitäten, die zu einer spürbaren Modulation der Resonatoreigenfrequenz hätten führen können, wurden nicht beobachtet.

4. Technisches Konzept eines supraleitenden Nachbeschleunigers (SNB)

Bedingt durch die schwache Abhängigkeit des Transittimefaktors von der Einschußenergie pro Nukleon kann der in der Teststrecke erprobte Wendelresonator ohne Geometrieänderung über die gesamte Länge eines Nachbeschleunigers eingesetzt werden. Die in der Studie geforderte Endenergie von 6 MeV/N für eine Massenzahl von ca. 80 macht eine Mindestzahl von 48 Resonatoren mit einer durchfallenen Spannung von 13 MV erforderlich. Hingegen beschränkt sich der nachfolgende Entwurf auf einen Nachbeschleuniger mit 32 Resonatoren und einer durchfallenen Spannung von 9.4 MV, der eine ausbaufähige Minimallösung darstellt. Eine weitere Verringerung der Resonatoranzahl wäre wegen des prinzipiellen Aufwandes für die Supraleitungstechnologie nicht sinnvoll. Eine optimale Baulänge der Kryostate als Kompromiß zwischen Kryoverlusten und Handlichkeit ergibt sich bei einer Zusammenfassung von jeweils 8 Resonatoren mit 2 Fokussierelementen (Kap. 4.2) in gleichen Kryostaten. Die erreichbaren Endenergien für Ionen in den interessierenden Massenbereich $A_p < 80$ amu für Nachbeschleuniger mit 4 bzw. 6 derartigen Kryostatmodulen entsprechend den genannten 32 bzw. 48 Resonatoren ist im Vergleich zur Endenergie des MP-Tandems und den Coulombschwellen in Abb. 12 angegeben.

Das Nachbeschleunigerkonzept geht von einer Serienfertigung der in der SNB-Teststrecke erprobten Resonatoren und der dazugehörigen Hf-Systeme aus. Eine besondere Bedeutung hat die Zuverlässigkeit des Vakuumsystems (Kap. 4.4), das eine Beschädigung von supraleitenden Oberflächen verhindern soll. Die Kryostate mit der Transferleitung (Kap. 4.5) und die Kälteanlage (Kap. 4.6)

wurden entsprechend der Größe der Gesamtanlage neu konzipiert.

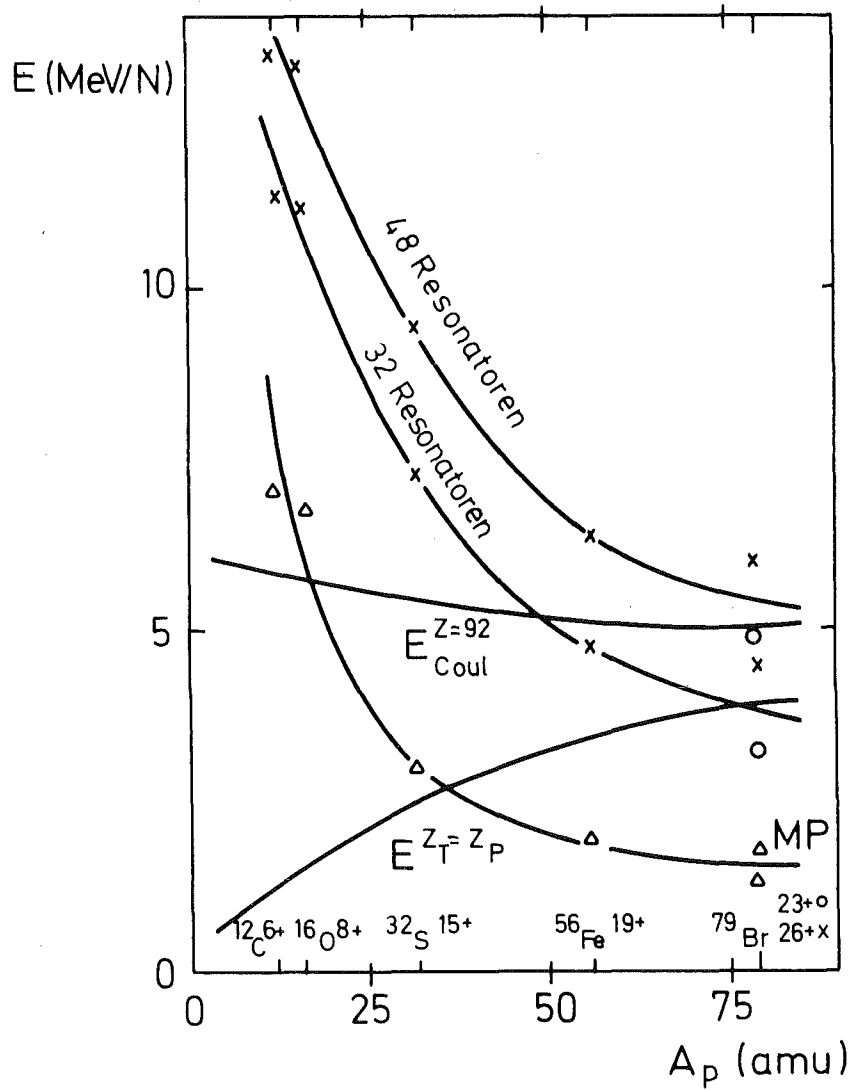


Abb. 12: Endenergien nach dem supraleitenden Nachbeschleuniger mit 32 bzw. 48 Resonatoren im Vergleich zu den Injektionsenergien aus dem MP-Tandem und den Coulombbarrieren.

4.1. Resonatoren

Nachdem die zwei Testresonatoren im IEKP und der dritte in der Industrie mit einem kostengünstigen Schweißverfahren problemlos hergestellt werden konnten und sich die Oberflächenpräparation als reproduzierbar erwiesen hat, werden bei einer Serienherstellung derartiger Resonatoren keine Schwierigkeiten erwartet. Der Resonator selbst kann unverändert übernommen werden, lediglich die Hf-Konnelleitungen sollten vereinfacht werden.

4.2 Fokussierung und Strahldynamik

Zur Fokussierung in einem supraleitenden Nachbeschleuniger kommen magnetische Quadrupole und Solenoide infrage. Die einfachste Möglichkeit wäre die Verwendung von konventionellen, normalleitenden Quadrupolen. Diese Lösung hat jedoch für einen supraleitenden Wendelnachbeschleuniger den Nachteil, daß der Kryostat häufig durch warme Strecken zu unterbrechen wäre. Ferner muß die Justierung (Genauigkeit ± 0.1 mm) durch die Apertur des Beschleunigers unter vollständiger Belüftung erfolgen, so daß eine Überprüfung und Korrektur der Justierung nach Inbetriebnahme problematisch ist. Die Verwendung von supraleitenden Quadrupolen ist wegen der relativ komplizierten Spulen teuer und führt zu erheblichen Nachteilen bei der Justierung. Daher ist die Benutzung von supraleitenden Solenoiden die sinnvollste Lösung, falls die notwendigen Feldstärken ausreichend niedrig sind, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Die Brechkraft eines Solenoids ist gegeben durch

$$(1) \quad f_{\text{solo}}^{-1} = \frac{\bar{B}_z^2 l_{\text{solo}}}{(2 p_0)^2 e^2 \zeta^2}$$

wo \bar{B}_z die längs der Achse gemittelte Feldstärke des Solenoids, l_{solo} die effektive Länge von \bar{B}_z , p_0 der Sollimpuls und ζ der Ladungszustand der zu beschleunigenden Ionen sind.

Das Solenoid dient dem Zusammenhalten des Strahls endlicher Emittanz ϵ und der Kompensation der Defokussierung des Strahls bei der Beschleunigung. Für die Defokussierung durch eine Wendel gilt dabei:

$$(2) \quad \delta = r'/r = - \frac{\pi}{2} \frac{\zeta e E_0 T}{W_0 \beta_0 \lambda} l_W \sin \phi_s$$

wo E_0 die maximale Achsenfeldstärke, T der Transittimefaktor, W_0 die kinetische Energie, $\beta_0 = v_0/c$ die relative Geschwindigkeit, l_W die effektive Wendellänge und ϕ_s die Sollphase sind.

Untersuchungen zu Anwendung von Solenoiden in supraleitenden Schwerionenbeschleunigern^{41, 42} ergaben Werte für $B_z^2 l_{\text{Solo}}$ zwischen 1 und 6 T²m für Strahlsteifigkeiten, wie sie für einen Nachbeschleuniger hinter einem Tandem vorkommen. Diese Werte entsprechen Feldstärken zwischen 2 T und 6 T bei einer effektiven Solenoidlänge von 15 cm. Da diese Rechnungen Abschätzungen von Extremwerten ($\cos \mu = +1$ und -1) entsprechen und keine klare Information über die Akzeptanz ergeben, wurde in strikt periodischer Näherung⁴³ für eine Symmetriezelle bestehend aus vier Wendeln und einem Solenoid Rechnungen durchgeführt. Abb. 13 zeigt die Ergebnisse für $\cos \mu$ und die Akzeptanz ϵ als Funktion der Feldstärke B_{Solo} . Die Übereinstimmung mit den Abschätzungen in^{41, 42} ist gut. Die Akzeptanz von etwa 7 cm mr bei 5 T ist völlig ausreichend.

Die technische Realisierung eines Solenoids wurde ebenfalls in⁴¹ theoretisch und in⁴² experimentell untersucht. Insbesondere zeigen sie eine Möglichkeit das magnetische Feld auf weniger als 0.16×10^{-4} T in 10 cm Abstand abzuschirmen. Dieser Wert liegt weit unter der kritischen Feldstärke, so daß ein sicherer Betrieb von supraleitenden Hochfrequenzresonatoren in der Nähe der Solenoide möglich ist.

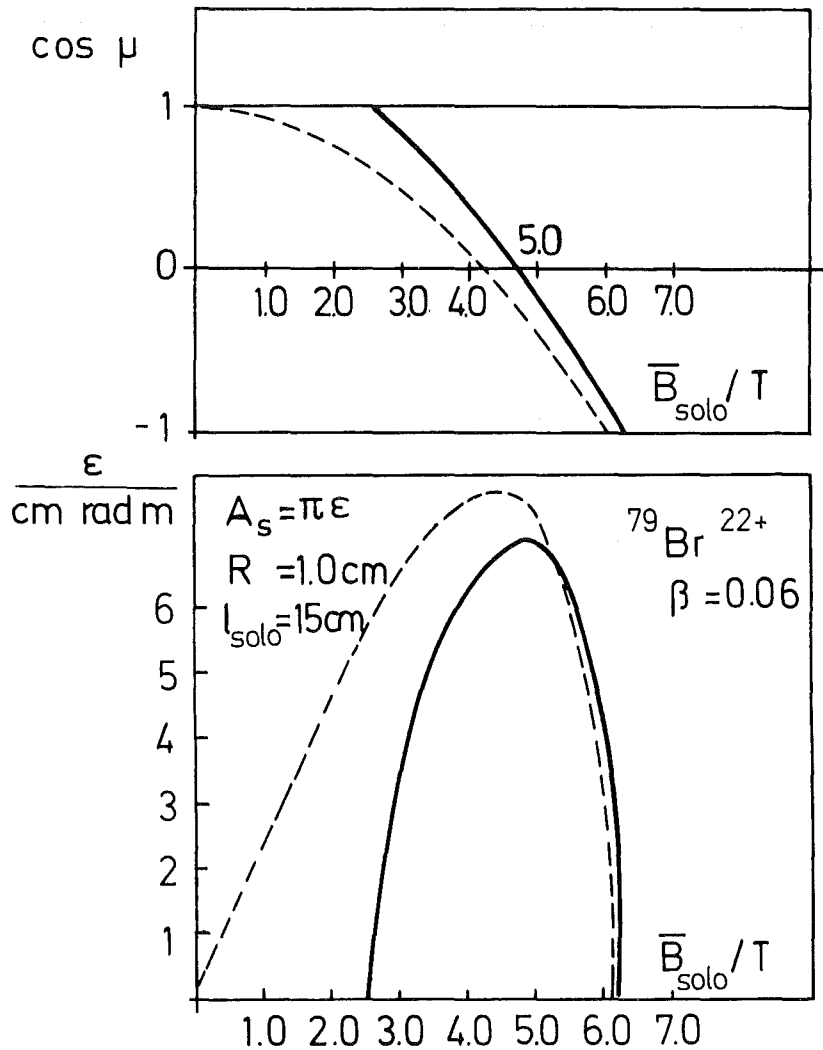


Abb. 13: $\cos \mu$ und die Akzeptanz $\epsilon = r r'$ bei Solenoidfokussierung als Funktion der Feldstärke \bar{B}_{sdo} berechnet für eine Symmetrierzelle in periodischer Näherung mit Aperturradius 1 cm und effektiver Solenoidlänge 15 cm. Die gestrichelte Kurve wurde mit $\delta = 0$ (ohne Defokussierung durch Beschleunigung), die durchgezogene Kurve mit $\delta = 1.59 \text{ mrad/cm}$ (143 MeV, Br^{22+} , $\beta = 0.06$) berechnet.

Die nächste wichtige Frage ist die nach der Strahldynamik und der Strahlqualität eines supraleitenden Wendelnachbeschleunigers. Ohne detaillierte Rechnungen lassen sich hierzu Aussagen aus Rechnungen für einen Nachbeschleuniger mit Spiralresonatoren herleiten.⁴⁴ Da die Feldverteilungen auf der Achse von

$\lambda/2$ -Wendel und Spiralresonator und daher das Verhalten des Transittimefaktors ähnlich sind, dürfen die Ergebnisse für die longitudinale Emittanz übertragen werden. Das Gleiche gilt für die radiale Emittanz, da die Kopplung zwischen longitudinalem und radialem Phasenraum wegen der großen Einschußgeschwindigkeit nach dem Tandem vernachlässigbar ist und die strikt periodische Näherung zur Berechnung der Akzeptanz ausreicht.

Die typische longitudinale Emittanz hinter einem Pulsungssystem von $\epsilon_1 = \Delta W \Delta\phi = 3.5^\circ \text{MeV}$ wird ohne Verzerrungen (Form der Randkurve bleibt Ellipse) bzw. Vergrößerung beschleunigt, wenn der Strahl auf $|\Delta\phi| \leq 7^\circ \approx \pm 200 \text{ ps}$ paketierr wird. Als Grenzen für die Phasenstabilität der einzelnen Wendeln wurde dabei $\pm 1^\circ$ und für die Sollphase $\phi_s = -20^\circ$ angenommen. Ebenso wird auch die maximale radiale Emittanz von $\epsilon_r = r r' = 0,8 \text{ cm mr}$ ohne Verzerrungen beschleunigt. Für Quadrupolfokussierung kommen Rechnungen⁴⁵ bei einem supraleitenden Quadrupolduplett für 4 bzw. 5 Wendelresonatoren zu vergleichbaren Ergebnissen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß ein supraleitender Wendelnachbeschleuniger für schwere Ionen mit Solenoidfokussierung realisierbar ist und die guten Strahleigenschaften des Tandemstrahls erhalten bleiben.

4.3 Hochfrequenzsystem

Das Regelungssystem zur Hf-Versorgung und Stabilisierung der Resonatoren hat sich während des Betriebs der Teststrecke als funktionstüchtig erwiesen. Der gleichzeitige Betrieb einer Vielzahl derartiger Systeme wird durch die automatische Inbetriebnahme und Überwachung jedes Einzelsystems wesentlich erleichtert. Die Flexibilität des Nachbeschleunigers wird durch eine Rechnersteuerung der Amplituden- und Phasensollwerte gewährleistet.

Eine Schnittstelle zur digitalen Amplitudensollwerteingabe ist vorhanden. Ein derzeit im IEKP in Entwicklung befindliches Phasenreferenzsystem kann übernommen werden.

Für eine Serienfertigung ist die Temperaturabhängigkeit der Amplitudenmeßstelle durch Thermostat zu verringern und der Stellbereich des elektronischen Frequenzstellgliedes auf 1 kHz einzuengen, wodurch die Hf-Leistungsreserve für eine Überschreitung der Sollfeldstärke im Resonator um 30 % ausreicht. Zusätzlich ist eine kostensparende Vereinfachung des Stellgliedes als Folge der Stellbereichsverkleinerung möglich.

4.4 Vakuumeinrichtungen

Strahlvakuum

Um die supraleitenden Oberflächen von Kontamination zu schützen, müssen neben der Forderung nach größtmöglicher Sauberkeit (Freiheit von Staub und Öl) im gesamten Strahlvakuumraum besondere Ansprüche an die Störsicherheit des Strahlvakuum gestell werden. Dem wird in dem folgenden Konzept des Strahlvakuumsystems Rechnung getragen:

Als Pumpsätze für das Strahlvakuum eignen sich Turbomolekularpumpen mit einem Saugvermögen von 70 l s^{-1} , welche an den Beschleunigerenden und in den Zwischenräumen der Kryostate einzusetzen sind. Jede Pumpe wird auf der Saugseite bei Störungen (Überhitzung, Netzausfall) durch ein druckgesteuertes Ventil abgetrennt. Steigt infolge von Pumpenausfall oder Leckage der Druck auf Werte $> 10^{-6}$ Torr, so schließen von den im Strahlweg an sämtlichen Ein- und Ausgängen der Kryostaten befindlichen druckgesteuerten Schiebern diejenigen, die der alarmierenden Meßstelle benachbart sind. Zusätzlich werden bei jedem Druckanstieg die Schieber an **beiden Enden** des Beschleunigers geschlossen. Um Schäden durch Vakuumzusammenbrüche im ausgedehnten Strahlrohrsystem des Experimentierbereichs oder des Tandems zu vermeiden, sind schnellschließende Ventile an **beiden Enden**

des Beschleunigers angeordnet, die von in Abständen vorgelagerten Meßstellenpaaren ausgelöst werden. In Abb. 14 ist die Anordnung der Strahlvakuumeinrichtungen schematisch dargestellt.

Isoliervakuum

Das Isoliervakuum wird für jeden Kryostaten mit einer eigenen Turbomolekularpumpe von 250 l s^{-1} Saugvermögen in Hochvakuumausführung erzeugt. Erfahrungsgemäß ist für eine ausreichende Isolation der Kryostaten gesorgt, wenn an den Saugstutzen ein Druck $< 10^{-5}$ Torr erreicht wird.

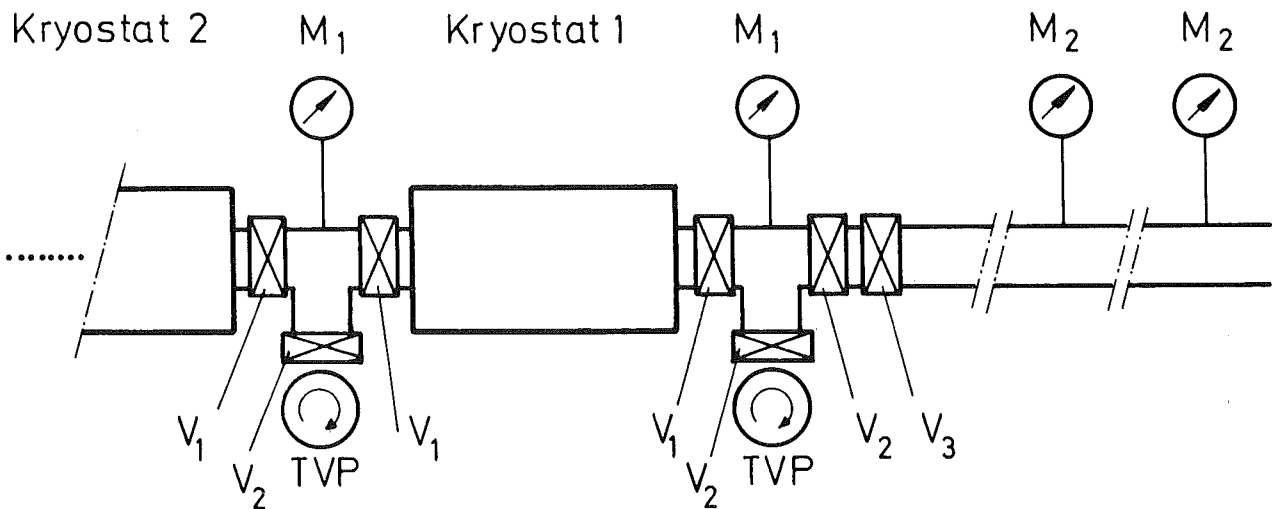


Abb. 14: Strahlvakuumsystem

- V₁.V₂: Druckgesteuertes Ventil
- V₃: Schnellschlußventil
- M₁: Druckmeßgerät, steuert benachbarte Ventile V₁
- M₂: Druckmeßgerät, steuert V₃

4.5 Kryostate und He-Transferleitungen

Das Kühlungskonzept für den Nachbeschleuniger geht von einer Anwendung des an der Teststrecke erprobten Kühlverfahrens (Kap. 3.1.3) aus.

Kühlung der Resonatoren

Entsprechend der Anordnung in der Teststrecke ist vorgesehen, die acht in einem Kryostaten befindlichen Resonatoren in Serie zu speisen. Dadurch wird der gesamte Massenstrom mit dem Vorteil des besseren Wärmeübergangs und ohne Probleme der gleichmäßigen Aufteilung bei Parallelschaltung mehrerer Einheiten durchgesetzt und eine hohe Kühlreserve für lokal auftretende überhöhte Wärmestromdichten geschaffen. Rechnungen der Druckabfälle³⁸ zeigen, daß im ungünstigsten Fall bei einem Durchsatz von 2 g/s^{-1} die Druckabfälle mit $< 200 \text{ mbar}$ vernünftig sind.

Kühlung der Hochfrequenzkoppelleitungen

Die Kühlung der Hochfrequenzleitungen ist aufgrund der geringen Strombelastung unproblematisch, ihre Ausführung ist zusammen mit der detaillierten Konstruktion der Kryostaten festzulegen. In den Annahmen über die Kälteleistung wurde davon ausgegangen, daß der gesamte Wärmeeinfall, der in diesen Leitungen entsteht, ($< 1 \text{ W}$ pro Resonator) in das He-Bad einströmt.

Methoden, um den Wärmeeinfall bei 4 K weiter zu reduzieren, sind erprobt und können bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Anforderungen an Kryostate

Die Kryostate, in welchen die Beschleunigungsstrukturen zu kühlen sind, müssen sehr gut wärmeisoliert sein, ein hohes Maß an Dichtheit auch nach vielen Temperaturzyklen aufweisen und im Falle von Defekten an Struktur- oder Kryostatteilen montagefreundlich zugänglich sein. Die Forderungen nach hoher

Zuverlässigkeit, der Möglichkeit einer schnellen Störfallbeseitigung in Verbindung mit geringen Betriebskosten und Investitionskosten sind widersprüchlich und lassen eine Vielzahl von Ausführungsvorschlägen zu.

Kryostatkonzept

Das hier vorgeschlagene Konzept ist primär auf hohe Verfügbarkeit der Beschleunigungsstrecke ausgerichtet. Es geht davon aus, daß diese in vier gleiche Abschnitte (Kryostate) mit je acht gleichen Wendelsektionen aufgeteilt wird, welche im Bedarfsfalle auch autonom kalt- bzw. warmgefahren und montiert bzw. demontiert werden können, während die drei restlichen Kryostate ungestört an der Kälteanlage betrieben werden. Daraus ergeben sich folgende Vorteile:

- Fehler können durch die Aufteilung des Systems leichter aufgesucht und beseitigt werden. Dadurch werden mögliche Ausfallzeiten reduziert.
- Während der Beseitigung einer Störung können die übrigen Kryostate weiterbetrieben werden. Ein unnötiges Aufwärmen und Abkühlen des ganzen Beschleunigers entfällt. Dadurch werden Betriebskosten gespart und die Materialbelastung durch häufige Temperaturzyklen vermieden.
- Durch ein Strahlrohrzwischenstück mit normalleitenden Fokussierelementen kann ein Kryostat ersetzt werden und dadurch 75 % der Leistung des Beschleunigers zur Verfügung gehalten werden.

Die Forderung, jeden Kryostaten autonom betreiben zu können, verlangt neben der Unterteilung der "Strecke" (Strahlvakuum, He-Raum 4 K, He-Raum 80 K, Isoliervakuum) auch je ein externes Leitungssystem für den 4 K- und den 80 K-Kreislauf mit entsprechenden Stichleitungen zu den Kryostaten und mit wärmeisolierten Ventileinheiten zu verlustarmen Abtrennen des defekten Kryostaten vom übrigen kalten System. Außerdem sind zusätzliche Anschlüsse und Einrichtungen für das separate Kalt- und Warmfahren der Kryostate notwendig.

Die Einbauten erfordern eine große Anzahl von Durchführungen aus dem He-Raum zur Raumtemperatur. Um diese Durchführungen montieren zu können, sind seitliche Luken in den einzelnen Schalen des Kryostaten vorgesehen, die sich über die gesamte Länge erstrecken. Die Kaltdichtung der Luke im He-Tank erfordert eine Extrapolation der im IEKP vorhandenen Erfahrungen.

Im einzelnen geht der schematische Aufbau des Kryostaten aus Abb. 15 bzw. Abb. 16 hervor. Jede Beschleunigungsstrecke besteht aus 8 je ca. 300 mm langen Wendelsektionen, 2 supraleitenden Solenoiden gleicher Länge, 1 Eintrittswärmeaustauscher und 7 Kondensatoren. Der He-Tank hängt an schlecht wärmeleitenden Zugstäben, mit Verstellmechanismus zum Ausrichten der Struktur im Strahl. Die Dome nehmen die Hochfrequenzleitungen, das Expansionsventil und elektrische Meßleitungen auf. Die Kältemittelzu- und -abspeisung erfolgt von der Seite des zur Kryostatkette parallel verlaufenden Transferleitungssystems durch einen zusätzlichen Dom, in welchem auch das Zweiwegeventil untergebracht wird. Der gesamte He-Tank ist von einem superisolierten Kälteschild umgeben, das durch He-Gas auf ca. 80 bis 100 K Temperatur gehalten wird. Durch Verwendung des Kälteschildes wird der Wärmeeinfall in den He-Tank sowohl durch die Isolation wie auch durch die Edelstahl-Verbindungssteile zwischen Außentank und Innentank auf mindestens 1/6 reduziert. Um bei einer längeren Betriebsunterbrechung die supraleitenden Strukturen und kalten Flanschungen auf Temperaturen < 100 K halten zu können, ist eine zweite Kühlschlange, welche mit LN_2 beaufschlagt werden kann, vorgesehen ("Notkühlung"). Die Notkühlung vermeidet erhöhte Betriebskosten und Materialbeanspruchung durch häufiges Aufwärmen auf Raumtemperatur.

Konzept für He-Transferleitungen

Das Transferleitungssystem verbindet die Coldbox der Kälteanlage über je eine 4 K- und 80 K-Hauptleitung und entsprechende Stichleitungen mit den Kryostaten. Die Länge der Hauptleitungen beträgt je ca. 10 m, die der Verbindungsleitung zur Coldbox ca. 16 m.

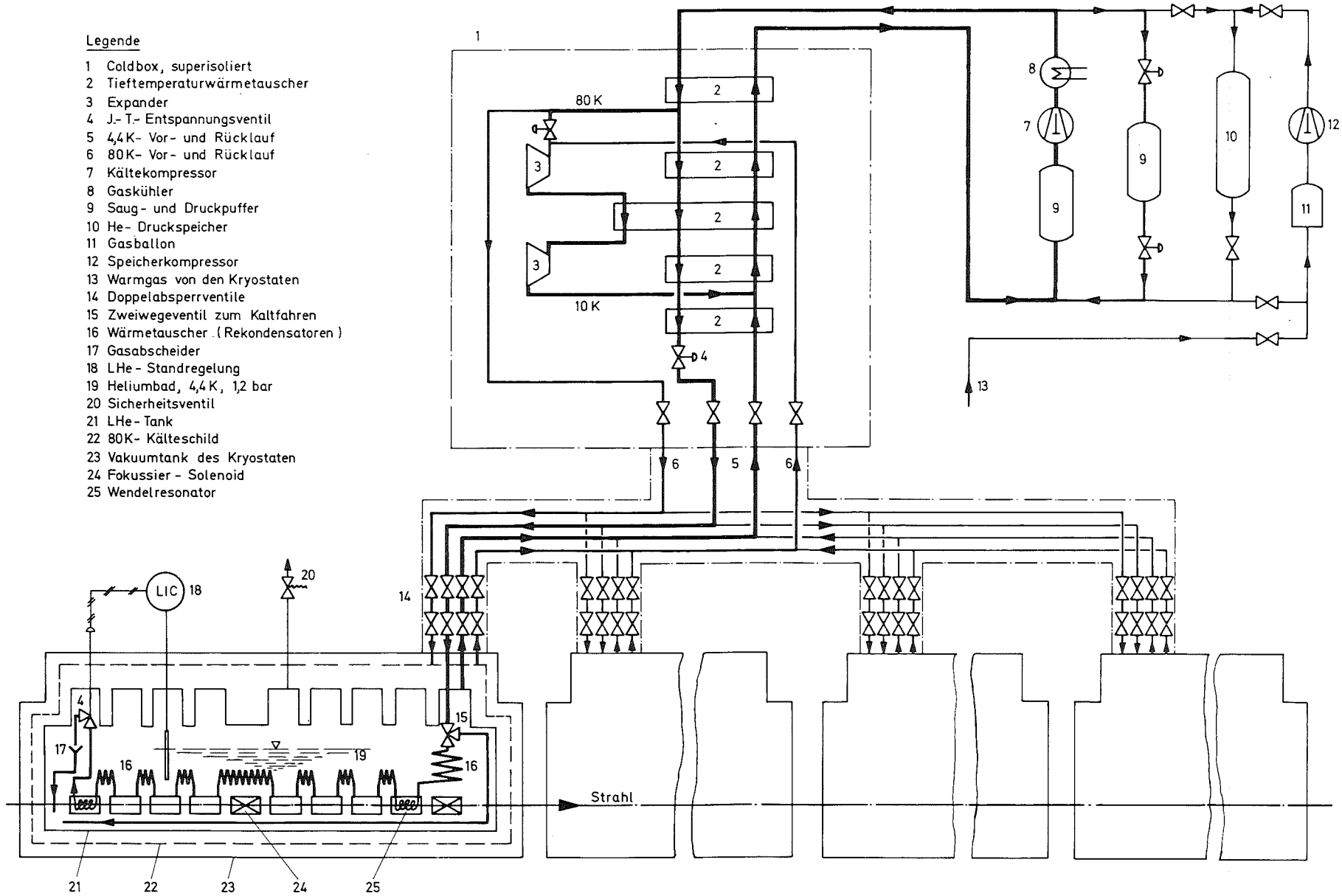


Abb.15: Fließschema für SNB mit He-Kälteanlage und Kryostaten

Es bietet sich an, alle 4 Leitungen (Vor- und Rücklaufleitungen des 4 K- und 80 K-Kreislaufes) parallel in einem gemeinsamen Vakuumrohr zu führen und auch hier den Wärmeeinfall auf die 4 K-Leitungen durch Einbau eines 80 K-Kälteschildes zu reduzieren. In die Stichleitungen sind wärmeisolierte, dicht schließende Absperrorgane einzubauen. Beispielsweise können jeweils zwei konventionelle Kaltventile in Serie geschaltet und der Raum zwischen den geschlossenen Ventilen evakuiert werden, falls ein Kryostat vom übrigen System abzutrennen ist.

Kaltfahren des Kühlkreislaufes

Beim Kaltfahren des kompletten Kühlkreislaufes wird das He-Gas zunächst bei Parallelschaltung der 4 Kryostate durch entsprechende Stellung des Zweiwegeventils durch den He-Tank, die Resonatoren und supraleitenden Solenoide von unten umspülend ("Brausenrohr") gefahren. Dadurch wird eine schnellere und gleichmäßigere Abkühlung der "großen Massen" erreicht, wobei die Wendeln in den Resonatoren verzögert abkühlen. Verunreinigungen im Strahlvakuum kondensieren auf diese Weise an den Strahlrohren und der Resonatorwand, nicht aber auf den hohen Feldstärken ausgesetzten Wendeloberflächen. Die gleichmäßige Mengenaufteilung auf die Kryostate erfolgt durch Temperaturüberwachung des Tanks und der Struktur und entsprechende Einstellung der Ventile. Anschließend werden die Kryostate nacheinander mit je ca. 200 l He aufgefüllt.

Das Abkühlen des Systems von Raumtemperatur bis zur Betriebsbedingung dauert ca. 2 Tage. Der Vorgang kann beispielsweise durch folgende Maßnahmen beschleunigt werden:

- Flüssig-Stickstoff-Pfad innerhalb der Coldbox,
- Zusätzliche Expansionsmaschine,
- Zuführung von gespeichertem flüssigem He.

Warmfahren eines Kryostaten

Das separate Warmfahren eines Kryostaten kann nach Ausdampfen des flüssigen He mit einem Anwärmer und Gebläse an jedem Kryostaten geschehen. Das Wiederkaltfahren könnte bis 80 K durch

Vorkühlen mit LN_2 und danach durch Überhebern von LHe aus einer LHe-Transportkanne erfolgen. Spätestens nach Erreichen eines geringen Flüssigkeitsstandes kann auf den Kälteanlagen-Kühlkreis umgeschaltet werden.

Tab. II: Hauptdaten Kryostate

Kryostate: Anzahl	4
Typ	He I-Badkryostat
Betriebstemperatur	4,4 K
LHe-Inhalt	ca. 200 l
Kühlung Resonatoren	Zweiphasiges He I, ca. 2 g/s
Außendurchmesser	max. 800 mm
Länge außen	3800 mm
Höhe Strahlrohr	1750 mm
Höhe Domdeckel	ca. 2350 mm
Kryostatverluste	≤ 12 W
Wärmeeinfall durch Einbauten	≤ 18 W

4.6 Kälteanlage

Kälteleistung

Tabelle III gibt eine Bilanz der erwarteten Kälteleistung.

Tab. III:

Kryostatgrundverluste	12 W/Kryostat	48 W
Resonatorverluste incl. HF-Leitungen	16 W/Kryostat	64 W
Fokussierungselemente	2 W/Kryostat	8 W
Transferleitungssystem mit Ventilen		50 W
Reserve für Regelung und Sicherheit		30 W
gesamte Kälteleistung		200 W

Eine genauere Berechnung der Kälteleistung ist erst nach detaillierter Konstruktion von Kryostaten und Leitungssystemen zu erhalten. Insofern kann die tatsächliche Kälteleistung um ca. $\pm 10\%$ von diesen Angaben abweichen. Der zusätzliche Leistungsbedarf auf 80 K-Niveau für Kälteschilde von Kryostaten und Transferleitungen beträgt etwa 500 W.

Arbeitsschema der Kälteanlage

Diese Leistungsanforderungen können von bewährten Standardanlagen verschiedener Herstellerfirmen erfüllt werden. Solche Anlagen bestehen im wesentlichen aus den drei Hauptkomponenten He-Kompressor, Coldbox und Steuerschrank und arbeiten nach folgendem Prinzip (Abb. 15): Das im Kompressor verdichtete He-Gas wird innerhalb der vakuumisolierten Coldbox auf die Betriebstemperatur abgekühlt. Dazu wird ein Großteil des He-Gases nach einer ersten Vorkühlung in Gegenstromwärmeaustauschern für den eigentlichen Vorkühlkreis abgezweigt und in Expansionsmaschinen arbeitsleistend und nahezu isentrop bis unterhalb der Inversionstemperatur des He entspannt (Claude-Prozeß). Die Kälte wird über mehrere Wärmeaustauscher im Gegenstrom vom Vorkühlkreis auf den eigentlichen Nutzstrom übertragen, der dann unterhalb der Inversionstemperatur isenthalp in mehreren Stufen (Ventilen) entspannt und den Kryostaten zugeführt wird (Joule-Thomson-Prozeß). Das in den Kryostaten durch Verdampfung und weitere Entspannung auf die Arbeitstemperatur anfallenden "Niederdruck"-He-Gas wird im Gegenstrom zum Mitteldruck-He-Gas durch die Wärmeaustauscher zum Kompressor zurückgeführt.

Ausführungsformen

Die heute angebotenen He-Tieftemperaturanlagen unterscheiden sich vor allem durch die Art der Vorkühlung und durch die Maschinentypen (Kompressoren, Expansionsmaschinen). Anlagen mit Flüssigstickstoff-Vorkühlung (Kaskadenprinzip) arbeiten bei niedrigerer elektrischer Anschlußleistung und geringerem Durchsatz mit Kolbenexpansionsmaschinen. Bei jährlichen Betriebszeiten über ca. 2000 h sind diese Anlagen jedoch nur bei Verwendung einer zusätzlichen

Kältemaschine (Kryogenerator nach Philips-Stirling-Verfahren) betriebskostenmäßig konkurrenzfähig. Diese Zusatzeinrichtung erfordert zusätzliche Investitionskosten und elektrische Anschlußleistung. Modernere Anlagen arbeiten mit gasgelagerten Expansionsturbinen. Dabei handelt es sich um praktisch verschleißfreie und damit sehr zuverlässige Maschinen geringen Wartungsaufwandes, welche bei Serienschaltung von zwei Einheiten Kälte bei ca. 80 K (1. Stufe) und ca. 10 K (2. Stufe) erzeugen. Die bei Turbinen gegenüber Kolbenexpansionsmaschinen etwas geringeren Wirkungsgrade fallen im allgemeinen in Anbetracht der höheren Verfügbarkeit nicht ins Gewicht. Die He-Kompressoren sind meist mehrstufige ölfrei fördernde Trockenlaufverdichter. Über Schraubenverdichter mit anschließenden Ölabscheider liegen noch keine ausreichenden Betriebserfahrungen vor. Ein Vergleich der Anfang 1977 erhaltenen Richtdaten für Kälteanlagen mit LN₂-Vorkühlung (ohne Kryogenerator, mit 2 Kolbenexpansionsmaschinen, Trockenlaufkompressor mit Kolbenringen) mit einer Kälteanlage, welche ausschließlich He als Kühlmedium verwendet (2 in Serie geschaltete gasgelagerte Expansionsturbinen, Trockenlaufkompressor mit Labyrinthkolben), sagt folgendes aus. (siehe auch⁴⁷): Die "Wirkungsgrade" derartiger Kälteanlagen (elektrischer Anschlußleistung pro garantiertes Watt bei 4,4 K) liegen je nach Verfahren und Hersteller zwischen

0,5 und 0,6 kW/W

und die auf die garantierte Kälteleistung bei 4,4 K bezogenen Investitionskosten für die installierte Anlage zwischen

5 und 6 TDM/W.

In der Coldbox ist ein He-Reiniger integriert. Zur Speicherung des gesamten He-Inventars bei aufgewärmter Anlage wird der Kältekompressor und bei dessen Ausfall ein kleinerer Speicherkompressor mit Gasblase verwendet und damit das Gas in einen He-Druckspeicher für 1000 Nm³ gefördert.

Kälteanlagen moderner Bauart sind für Dauerbetrieb über mehrere 1000 h ausgelegt. Vorliegende Betriebserfahrungen bestätigen ihre Zuverlässigkeit^{4 8}. Größere Wartungsarbeiten können in 14 Tagen einer jährlichen Betriebspause durchgeführt werden.

Hauptdaten

Orientierende Parameter für eine Kälteanlage der Größe 200 - 250 W sind in Tab. IV zusammengestellt.

Tab. IV: Parameter der Kälteanlage

Kälteleistung im Refrigeratorbetrieb bei 4,4 K	200 - 250 W
Verflüssigungsleistung (alternativ)	50 - 60 l/h
Kälteleistung bei 80 K	ca. 500 W
Netzanschlußleistung	100 - 170 kW
Kälteerzeugung mittel	2 Kolbenexpansionsmaschinen + Vorkühlung mit LN ₂ oder 2 Expansionsturbinen
Kompressor - Durchsatz	ca. 500 - 1000 Nm ³ /h
- Enddruck	ca. 12 - 30 bar
Kaltfahrzeit Anlage	2 - 4 h

4.7 Gesamtaufbau

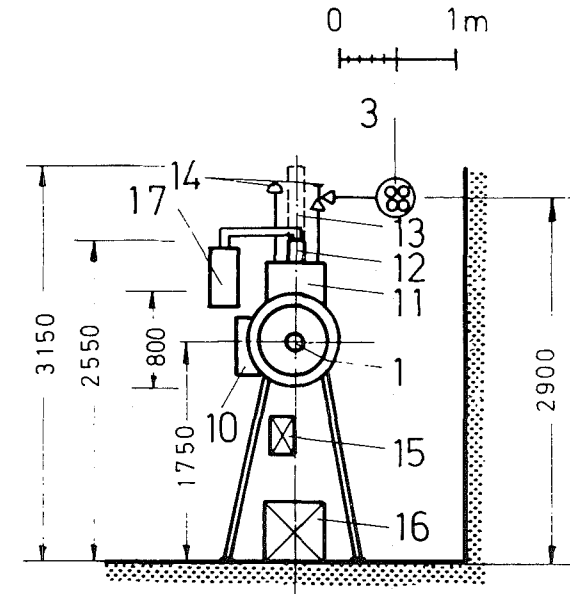
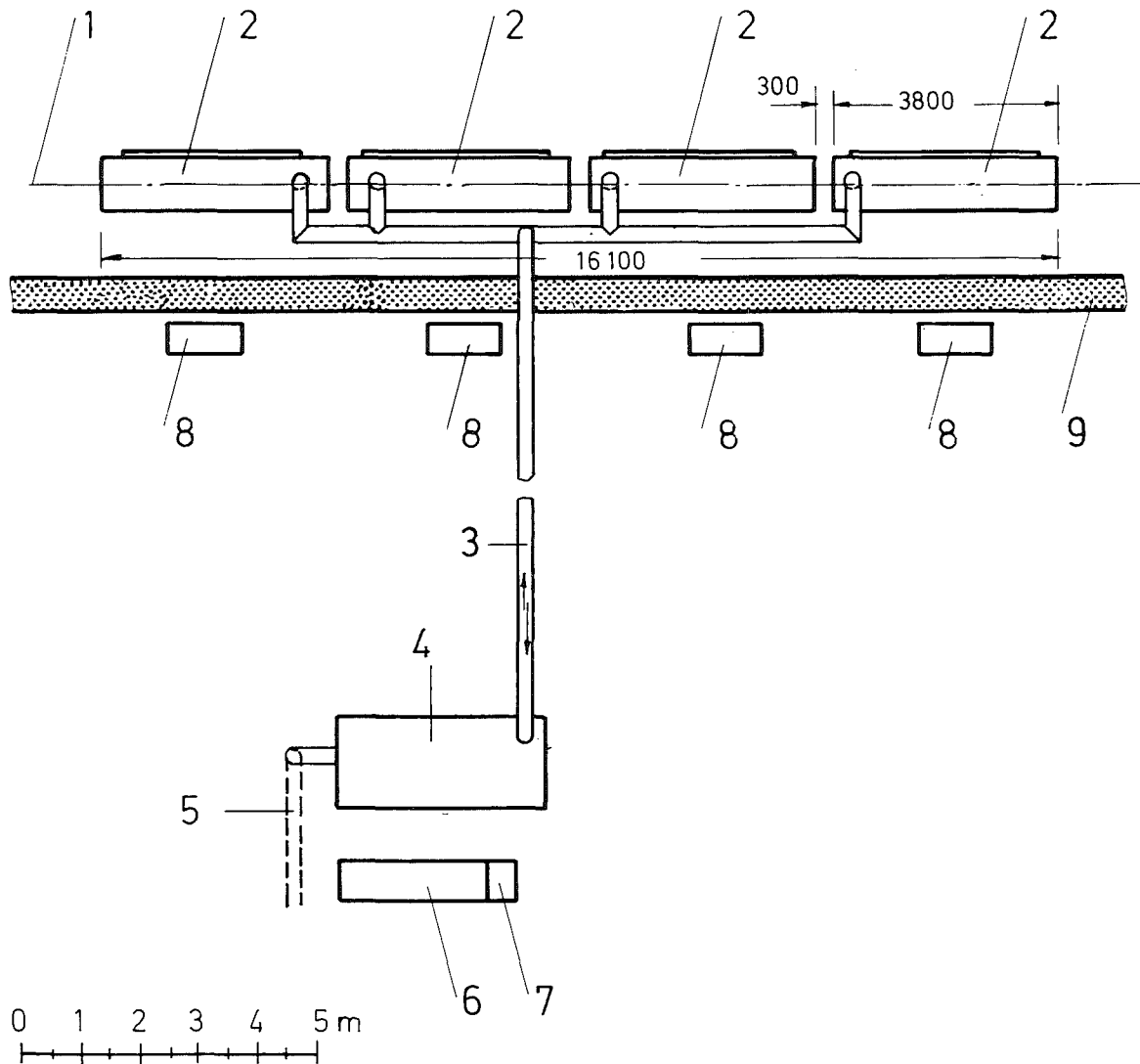
Um den Raumbedarf für einen supraleitenden Nachbeschleuniger mit 32 Wendelresonatoren zu verdeutlichen, werden nachstehend die wichtigsten Randbedingungen für die Aufstellung des Linearbeschleunigers und der notwendigen Versorgungseinrichtungen diskutiert.

Die Überlegungen gehen davon aus, daß der Linearbeschleuniger in einem geschlossenen Strahlenschutzbunker aufgestellt wird, während alle absetzbaren Versorgungseinrichtungen durch eine wartungsfreundliche Aufstellung außerhalb des Bunkers für Betrieb und Instandhaltung jederzeit zugänglich sind. Zu Vermeidung von Kälteverlusten ist es erforderlich, die Coldbox der Kälteanlage möglichst nahe an die Kryostate zu stellen, um kurze Kryoleitungen zu erhalten, während die Komponenten, die mit warmen Leitungen mit der Coldbox verbunden sind, auch in größerer Entfernung installiert werden können. Erschütterungen durch die Kompressoren werden durch eine Aufstellung außerhalb des Beschleunigergebäudes auf separatem Fundament unterdrückt.

Die vier Kryostate mit einer Gesamtlänge von rd. 16 m werden in der Strahlachse nach Rebuncher und Strahlpräparation möglichst platzsparend nahe der Wand des Strahlenschutzbunkers angeordnet (Abb. 16). Die Kryoverteilleitung wird seitlich oberhalb der Kryostate entlanggeführt, wo auch die Armaturen ihren Platz finden. Eine lichte Höhe des Strahlenschutzbunkers von 3,15 m reicht bei einer Strahlachsenhöhe von 1,75 m aus zur Montage der HF-Koppelleitungen. Die Resonatoren sind über die seitliche Montageöffnungen der Kryostate gut zugänglich. Die Pumpen für Isolier- und Strahlvakuum stehen unter bzw. zwischen den Kryostaten.

Die Coldbox enthält die Tieftemperaturwärmetauscher, die Expander, den Reiniger und die Armaturen. Sie wird außerhalb des Bunkers auf dem den Kryostaten am nächsten liegenden verfügbaren Platz zusammen mit den Schaltafeln für Kälteanlage und Vakuumpumpstände aufgestellt, so daß eine gute Zugänglichkeit, auch mit einem Kran gegeben ist.

Für die Kryoleitungen von der Coldbox zur Verteilleitung der Kryostate wurde eine Länge von 16 m angesetzt. Diese Länge ist wegen der Verwendung eines 80 K Strahlungsschildes noch akzeptabel.



Kryostat - Querschnitt

Legende

- 1 Strahlachse
- 2 Kryostate
- 3 He-Transferleitungen
- 4 Coldbox mit Expander und Reiniger
- 5 Warme Verbindungsleitungen zum Kompressorenhaus
- 6 Schalttafel für Kälteanlage
- 7 Steuerschrank für Vakuumpumpen
- 8 Hochfrequenz- und Regelungseinheiten
- 9 Strahlenschutzbunker
- 10 Seitliche Luke
- 11 Dom
- 12 Hf-Koppelleitungen
- 13 Ausbauhöhe für Koppelleitungen
- 14 Kaltventile
- 15 Hf-Verstärker
- 16 Vakuumpumpen
- 17 Frequenzstellglied

Abb.16: Raumbedarf für einen supraleitenden Nachbeschleuniger mit 32 Resonatoren

Wegen des erforderlichen separaten Fundaments für die Kompressoren ist ein Kompressorenhaus mit Ausmaßen von ca. 6 x 12 x 5 m in geeignetem Abstand (z.B. 30 m) von der Coldbox zu errichten. Es enthält den Kältekompressor, den He-Speicherkompressor, den 15 m³-Gassack, die Elektro-Verteilung und die Kompressor-Schalttafeln. Neben dem Gebäude werden der Druckspeicher für 1000 Nm³ He und die Saug- und Druckpuffer für den Kältekompressor aufgestellt. Die Verbindungsinstallation zur Coldbox für warmes He und Elektroversorgung wird in einem Schacht verlegt. Die Entfernung zwischen den Kryostaten und den Kompressoren (ca. 45 m) wirkt der Übertragung von mechanischen Schwingungen entgegen.

Die Hochfrequenz- und Regelungseinheiten werden für jeweils einen Kryostaten zusammengefaßt und hinter der Wand des Strahlungsschutzbunkers angeordnet. Die Hf-Verstärker sind in den Kryostatgestellen untergebracht.

5. Aufwand für Bau und Betrieb

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, welcher Zeit und Personalaufwand mit der Errichtung eines supraleitenden Nachbeschleunigers nach dem in Kap. 4 beschriebenen Konzept verbunden ist. Die Investitions- und Betriebskosten gehen von vorliegenden Industrieangeboten und von Erfahrungen aus, die im IEKP mit der Erstellung und dem Betrieb von Tieftemperaturanlagen gewonnen wurden. Die Angaben beschränken sich auf den Nachbeschleuniger. Die erforderlichen Anpassungsmaßnahmen am injizierendem MP-Tandem, Strahlführung und Strahlpräparation, die Rechnersteuerung für die Gesamtanlage sowie Strahldiagnose und Strahlenschutz sind bei den angegebenen Kosten nicht berücksichtigt.

Wenngleich der komplette Nachbeschleuniger industriell errichtet werden könnte, erscheint dennoch eine weitgehende Beteiligung der am Bau interessierten Institution als kostenoptimal. Insbesondere sollten die Fertigungsunterlagen der Komponenten durch Institutspersonal ergänzt werden. Das spätere Betriebspersonal des Beschleunigers sollte zur Montage herangezogen werden.

5.1 Bau des Nachbeschleunigers

Fertigung der Komponenten:

a) Kältemaschine

Es kann ein Standardrefrigerator industrieller Fertigung Verwendung finden.

b) Leitungssystem

Das Leitungssystem für 80 und 4.4 K Helium sollte nach Planungsunterlagen durch eine Industriefirma hergestellt werden.

c) Kryostate

Die Behälter sollen nach Fertigungszeichnungen industriell gefertigt werden. Instrumentierung und Einbauten erfolgen am Aufstellungsort.

d) Supraleitende Resonatoren

Ein Angebot über die Fertigung von 50 Resonatoren der beschriebenen Art durch einen Hersteller liegt vor. Ein Serienmuster brachte gute Ergebnisse (Kap. 3.1). Der Institutsbeitrag umfaßt Oberflächenbehandlung, Prüfung der Eigenschaften und Ausrüstung mit den erforderlichen Zusatzbauteilen, wie Frequenzkorrekturstempel und Koppelstiften und -Leitungen.

e) Hochfrequenz- und Regelungseinheiten

Einzelne Baugruppen (Stromversorgung, Verstärker, Wandler) sind industrielle Serienprodukte. Die Zusammenstellung der Schaltungen, Anfertigung der Gehäuse etc. kann sowohl in Institutswerkstätten, wie in kleineren Spezialunternehmen erfolgen. Prüf- und Abgleichsarbeiten erfolgt durch Institutspersonal.

f) Supraleitende Solenoide

Supraleitende Solenoide der benötigten Art werden industriell hergestellt.

Zeitplan

Der Zeitplan für den Bau des supraleitenden Nachbeschleunigers ist in Abb. 17 dargestellt. Nach einer halbjährigen Planungsphase erstreckt sich die Fertigung der Komponenten bis in das dritte Baujahr. Während die kältetechnischen Einrichtungen die kürzestmögliche Realisierungszeit bestimmen, ist die Fertigung der Resonatoren und Hochfrequenzeinheiten entsprechend gestreckt, um einen zu hohen Spitzenbedarf an Personal zu vermeiden. Montage und Komponententests erfolgen im dritten, die abschnittsweise Inbetriebnahme im vierten Baujahr. Der Zeitplan kann unter günstigsten Bedingungen bezüglich der Fertigung der Komponenten und unter Einsatz zusätzlichen Personals während der Test- und Aufbauzeit soweit verkürzt werden, daß eine Inbetriebnahme des Beschleunigers gegen Ende des dritten Baujahres erfolgen kann.

Personaleinsatz

Der Einsatz für Personal verschiedener Qualifikation während der Bauzeit ist in Abb. 18 dargestellt. Dabei ist nach projektzugehörigem (38 Mannjahre) und nichtprojektzugehörigem Personal (14.5 Mannjahre) unterschieden. Die zuletzt genannte Gruppe sind Mitarbeiter in Werkstätten bzw. Fremdpersonal. Der Arbeitsumfang für Personal mit speziellen Erfahrungen im Bereich Kryotechnik und Hochfrequenzsupraleitung wird auf 15 Mannjahre veranschlagt und ist in den Ansätzen berücksichtigt.

In der Betriebszeit geht der Personalbedarf auf 3.4 MJ/Jahr zurück (Abb. 18).

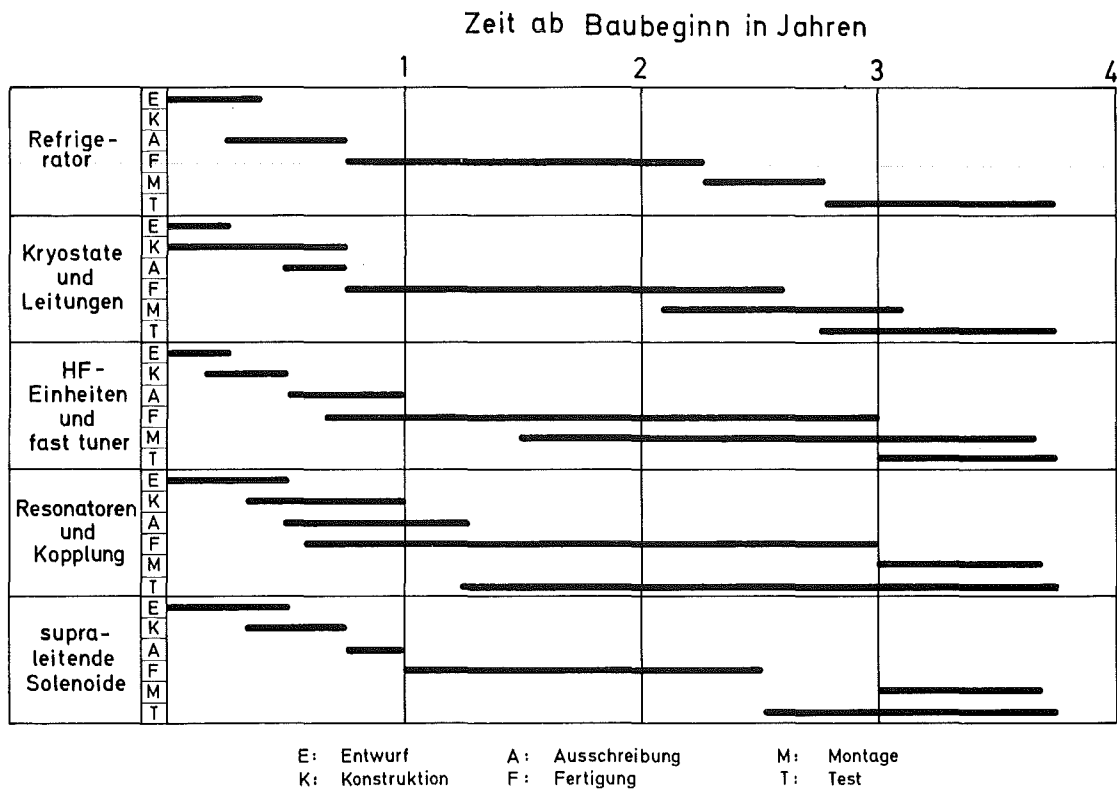


Abb. 17: Zeitplan für den Bau des supraleitenden Nachbarbeschleunigers

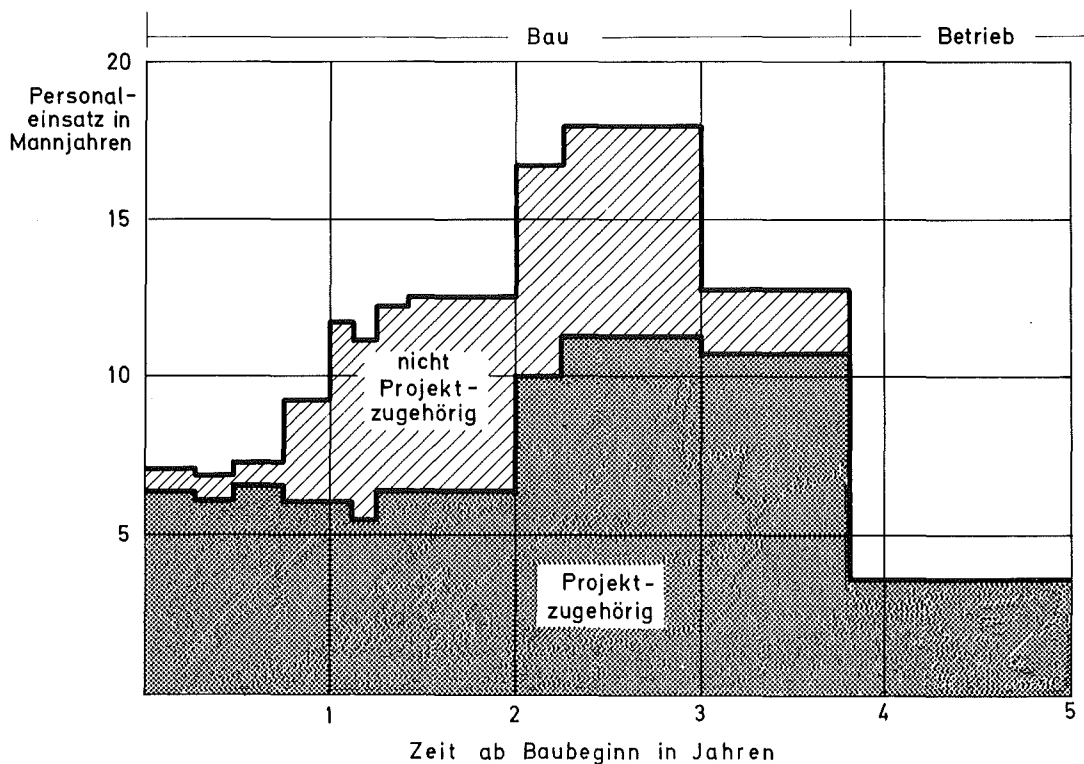


Abb. 18: Personaleinsatz während Bau und Betrieb eines supraleitenden Nachbarbeschleunigers

5.2 Betrieb

Es wird von einer jährlichen Betriebszeit von 3 000 h ausgegangen, wobei ein Betriebszyklus mindestens vier Wochen dauert. Betriebsunterbrechungen von bis zu etwa zwei Wochen Dauer werden durch Vorkühlung des Beschleunigers mit flüssigem Stickstoff überbrückt (s. Kap. 4.5). Bei längeren Stillstandzeiten ist Aufwärmen auf Raumtemperatur wirtschaftlicher. Während der Kaltfahrzeit muß die Kryoanlage von einem Operateur überwacht werden. Im stationären Betrieb ist dies nicht notwendig. Störungsmeldungen in der ständig besetzten Schaltwarte des Injektortandems und Rufbereitschaft eines Operateurs sind ausreichend.

Einzelne Komponenten des Beschleunigers wie Vakuumpumpen, Meßeinrichtungen, Ventile und Teile der Kälteanlage bedürfen regelmäßiger Wartung. Diese kann während des Betriebs und in einer jährlichen Betriebspause von etwa 14 Tagen erfolgen. Für die Kältemaschine sollte ein Wartungsvertrag mit der Lieferfirma abgeschlossen werden.

Kleinere Reparaturen werden vom Bedienungspersonal des Beschleunigers ausgeführt. Für größere Montagearbeiten muß Unterstützung durch angelerntes Personal des Instituts angefordert werden. Arbeiten an der Kältemaschine werden durch Personal des Herstellers überwacht (**siehe Betriebskosten**).

Ausfall eines Beschleunigungselementes erlaubt es, den Beschleuniger weiterzubetreiben. Eventuell ist eine Korrektur der Phasenbeziehungen der übrigen Resonatoren möglich. Größere Störungen, die zum Ausfall eines ganzen Abschnitts führen, können behoben werden, indem nur der betreffende Kryostat aufgewärmt wird. Sofern die Beseitigung einer solchen Störung längere Zeit in Anspruch nimmt, kann der betroffene Abschnitt durch ein Strahlrohr mit warmen Fokussierelementen ersetzt werden.

5.3 Investitionskosten

Die aufgeführten Investitionskosten sind nach dem Stand Ende 1976 angegeben. Die Kostenschätzung für die Kältemaschine beruht auf einem Angebot für eine vergleichbare Anlage. Die Kosten für Kryostate und Transferleitungen wurden aufgrund der Erfahrungen, die das IEKP durch Bau verschiedener Kälteeinrichtungen gewonnen hat, abgeschätzt. Für die supraleitenden Resonatoren liegt ein Angebot vor. Die Preise der supraleitenden Solenoide wurden vom ANL ermittelt ⁴⁹. Die Kosten für die Hochfrequenz- und Regelungseinheiten gehen teils auf Listenpreise der verwendeten Bauteile, teils auf Kalkulationen anhand der vorhandenen Baupläne zurück.

Die Investitionen pro MV durchfallene Spannung betragen 516 TDM nach Kostensätzen von 1977. Sie liegen damit noch unterhalb der Werte, die in der im August 1973 abgefaßten Studie¹ projiziert wurden (538 TDM/MV, Preisniveau 1973)

Investitionskosten

A. Kälteanlage

Refrigerator (250 W bei 4.5 K und 500 W bei 80 K)	1 300 TDM
Speicherkompressor und Heliumdruck- speicher	200 "
Reiniger	50 "
Zubehör, Meßgeräte, Automatisierung	100 "

Summe A: 1 650 TDM

B. Kryostaten, Leitungen, Vakuum

Heliumleitungen 80 K und 4.4 K	200 TDM
4 Kryostate à 4m, 45 TDM/m	720 "
Gestell	50 "
Meß-, Regeleinrichtungen für Kryostate	100 "
Vakuumpumpen	200 "
Autom. Ventile, Strahlweg	100 "
	<hr/>
Summe B:	1 370 TDM

C. Supraleitende Bauelemente

32 Resonatoren à 9 TDM	288 TDM
Tuner, Koppelleitungen etc. zu Resonatoren	160 "
Ergänzung der Einrichtungen für Oberflächenbehandlungen und Ausheizen	50 "
8 Fokussierungselemente (supraleitende Solenoide) incl. Netzgeräte à 12.5 TDM	100 "
	<hr/>
Summe C:	598 TDM

D. Hochfrequenz und Regelung

32 HF und Regeleinheiten in rationalisierter Fertigung à 20 TDM	640 TDM
zentrale Prüfeinheit (Ergänzung der vorhandenen Meßgeräte)	50 "
	<hr/>
Summe D:	690 TDM

Summe insgesamt: 4 308 TDM
=====

B. Wartung und Reparatur, sonst. Betriebsmittel

a) Kälteanlage

Wartungsvertrag Kältemaschine	7 TDM/a
Ersatzteile, Hilfsstoffe Kältemaschine	10 TDM/a
Sonderreparaturen + Generalrevision	15 TDM/a
	<hr/>
	32 TDM/a

b) Übrige Komponenten der Gesamtanlage

2 % / Jahr der Investitionskosten von 2.7 MDM 54 TDM/a

Summe der Wartungskosten 86 TDM/a

entspricht bei 3000 Betriebsstunden pro Jahr 28.70 DM/h

Summe der Betriebskosten

(bei einer kältetechnischen Betriebszeit von
3.000 h/a) 59.90 DM/h
=====

Literatur

1. H. Deitinghoff, H. Klein, M. Kuntze, J.E.Vetter, E. Jaeschke, R. Repnow "Studie zum Bau eines Nachbeschleunigers für mittel-schwere Ionen mit supraleitenden Helixresonatoren"
KFK 2141 (Karlsruhe 1975)
2. G. Hochschild, B. Piosczyk, J.E. Vetter, H. Ingwersen, E. Jaeschke, R. Repnow, H. Schwarz, Th. Walcher
Operation experiences with the test section of a superconducting heavy ion post accelerator
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-24, No. 3, 1150 (1977)
3. K.W. Shepard, C.H. Scheibelhut, R. Benaroya, L.M.Bollinger
Split ring resonator for the Argonne superconducting heavy ion booster
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-24, No. 3, 1147 (1977)
4. J.W. Noé, P. Paul, G.D. Spronse, G.J. Dick, J.E. Mercereau
The Stony Brook superconducting heavy ion booster project
IEEE Trans. Nuc. Sci. NS-24, No. 3, 1144 (1977)
5. J.S. Sokolowski, P.H. Ceperley, M. Samuel, M. Birk, H.F. Glavish, S.S. Hanna
Status report on Stanford's superconducting heavy ion linac project
IEEE Trans. Nucl. Sci, NS-24, No. 3, 1141 (1977)
6. L.M. Bollinger
Superconducting heavy-ion linacs
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-24, No. 3, 1076 (1977)
7. High Voltage Engineering Corporation, Burlington, Mass. USA
8. "Large Electrostatic Accelerators", D.A. Bromley editor,
Nucl. Inst. a. Meth. 122, 1, (1974)
9. "Überlegungen zu einer Nachbeschleunigungsstrecke für mittel-schwere Ionen am Heidelberger MP-Tandembeschleuniger,
MPI-H-1972-V 26 (Heidelberg 1972)

10. "Die Schwerionennachbeschleunigung am Heidelberger MP-Tandembeschleuniger", MPI-H-1976-V11 (Heidelberg 1976)
11. E. Jaeschke, Proceedings of the Second International Conference on Electrostatic Accelerator Technology, Straßburg, 1977; im Druck in Rev. Phys. Appl. 12, 153 (1977)
12. G. Hartig, P. Mokler, M. Müller, Z. f. Physik 210 (1968)312
13. G. Ihmels, E. Jaeschke, R. Repnow, Nucl. Inst. a. Meth. 138, 407 (1976)
14. K. Purser, General Ionec Corp., Ipswich, Mass., USA
private Mitteilung
15. R. N. Lewis, F. Lynch, Argonne Nat. Lab., USA
private Mitteilung
16. H. Ingwersen, B. Kolb, G. Ihmels, E. Jaeschke, R. Repnow, Th. Walcher, IEEE Trans. NS-24, No. 3, 1107 (1977)
17. Th. Walcher, Jahresbericht 1974 MPI-H, 124. (Heidelberg 1974)
18. B. Efken, D. Hahn, D. Hilscher, G. Wüstefeld, Nucl. Inst. a. Meth. 129, 219 (1975)
19. V.S. Nikolaev, T.S. Dimitriev/ Phys. Lett. 28A 277 (1968)
20. J.E. Vetter et al.
AECL-Report 5677, 106 (Chalk River, Canada, 1976)
21. K.W. Shepard et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-22, No. 3, 1179 (1975)
22. L.M. Bollinger et al., AECL-Report 5677, 95 (1976)
23. A.J. Sierk et al.
Part. Acc. 2, 149 (1971)
24. H. Klein et al., Part. Acc. 3, 235 (1972)
25. B. Piosczyk et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-22, No. 3, 1172 (1975)

26. Piosczyk, B.: Supraleitende Wendelresonatoren aus Niob zur Beschleunigung schwerer Ionen mit β zwischen 0.06 und 0.2
Herstellung und Messung
(1977) unveröffentlicht
27. Piosczyk, B.: Ein industriell gefertigter $\lambda/2$ -Wendelresonator aus Niob (1977) unveröffentlicht
28. Piosczyk, B.: Ein beweglicher supraleitender Kurzschlußstempel zur Frequenzeinstellung von supraleitenden Resonatoren
(1977) unveröffentlicht
29. Piosczyk, B. et al
Proc. V. All-Union Conf. Part. Acc. (Dubna 1976)
30. Piosczyk, B.:
KFK-Bericht 1991 (Karlsruhe 1974)
31. Schulze, D:
Dissertation (Universität Karlsruhe, 1971)
32. Hochschild, G., Schulze, D., Spielböck, F.:
IEEE, Trans. Nucl. Sci. NS-20, No. 3, 116 (1973)
33. Hochschild, G.: DT-PS 2 317 890 (1973)
34. Hochschild, G.: KFK 2094 (Karlsruhe 1975)
35. Jäger, R.: Diplomarbeit (Universität Karlsruhe, 1975)
36. Hochschild, G.: Mehrfach - Regelungssystem für den supraleitenden Ionen-Nachbeschleuniger
(1977) unveröffentlicht
37. Hochschild, G.: Elektronisches Frequenz-Stellglied für den supraleitenden Ionen-Nachbeschleuniger
(1977) unveröffentlicht
38. Vetter, J.E.: Zum Druckverlauf in einer turbulenten Zweiphasenströmung von Helium. Allgemeine Beziehungen und Anwendung auf ein Rohrsystem zur Kühlung von supraleitenden Resonatoren.
(1977) unveröffentlicht

39. Piosczyk, B.: Untersuchungen zu Strahlenschäden. Bestrahlung von $\lambda/2$ -Wendelresonatoren aus Niob mit Nickel-Ionen.
(1977) unveröffentlicht
40. Piosczyk, B.: Ergebnisse von Messungen an einem supraleitenden Wendelresonator aus Niob bei 106 MHz
(1975) unveröffentlicht
41. A.H. Jaffey and T.K. Khoe, Nucl. Inst. Meth., 131 413 (1974)
42. A.H. Jaffey, R. Benaroya, T.K. Khoe, AECL Report 5677, 102, (1976)
43. D. Boussard
"Focusing in Linear Accelerators" in A. Septier (ed.)
"Focusing of charged Particles", (1967) Academic Press, NY
44. E. Jaeschke, R. Repnow, Th. Walcher, H. Ingwersen, G. Ihmels, B. Kolb, H. Schwarz
IEEE, Trans, Nucl. Sci. NS-24 No. 3, 1136 (1977)
45. Deitinghoff, H., Klabunde, J.:
Teilchendynamik in einem supraleitenden Wendellinearbeschleuniger mit $\lambda/2$ -Sektionen für schwere Ionen
(1973) unveröffentlicht
46. A. Citron, J. Halbritter, M. Kuntze, H. Lengeler, J.E. Vetter
"Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochfrequenz-Supraleitung Kernforschungszentrum Karlsruhe", KFK-Ext. 03/76-05 (Dez. 1976)
47. T.R. Strobridge
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-16, 1104 (1969)
48. H. Katheder, W. Lehmann, F. Spath
"Kryotechnik für die Tieftemperaturprojekte des IEKP"
KFK-Nachrichten 1/1975, 33
49. A.H. Jaffey and T. Khoe
Nucl. Inst. and Meth. 121, 413 - 419 (1974)
50. H. Katheder, W. Lehmann, F. Spath
KFK-Ext. 3/74 - 9 (Karlsruhe 1974)

Danksagung

Allen Mitgliedern des Instituts für Experimentelle Kernphysik Karlsruhe und des Max-Planck-Instituts für Kernphysik Heidelberg, die uns bei der Durchführung dieser Arbeiten in vielfältiger Weise unterstützt haben, sei herzlich gedankt.

Unser besonderer Dank gilt

den Herren Prof. P. Brix und Prof. A. Citron für die Ermöglichung und Förderung dieser Arbeiten,

den Herren H. Daugart, M. Frauenfeld und Ch. Langer vom MPI für ihre unermüdliche Mitarbeit während der gesamten Bau- und Experimentierzeit,

den Herren

Prof. F.X. Eder , Zentralinstitut für TT-Forschung Garching
(Diskussion Kälteanlagen)

L. Schappals (Kryostatenkonstruktion + Erprobung)

N. Münch (Versuchsaufbau für Resonatoren)

G. Westenfelder (Nb-Keramikdurchführungen, Koppelleitungen)

H. Katheder (Entwurf des Testkryostaten)

H. Baumgärtner (Vakuumlühen)

K. Neumann (Schutzgasschweißungen)

für ihre wertvollen Beiträge.