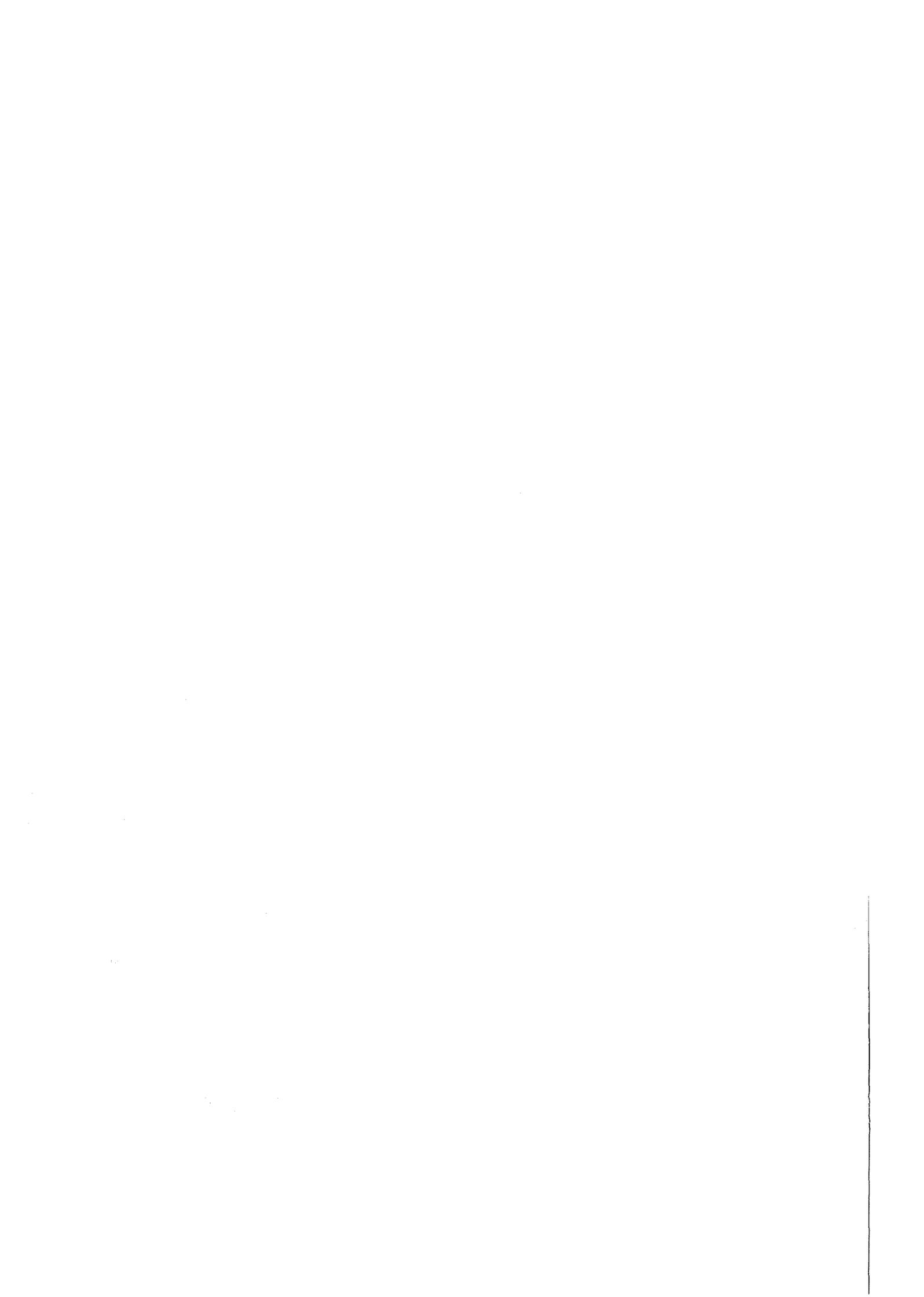


KfK 4505  
Dezember 1988

**Endbericht über die Ergebnisse  
der Vorprojektstudie von  
COSY MicroTec GmbH, Berlin  
und KfK zum Bau einer kompakten  
Synchrotronstrahlungsquelle für  
die Röntgentiefenlithographie im  
Kernforschungszentrum Karlsruhe**

**R. Klingelhöfer  
Institut für Kernverfahrenstechnik**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 4505

**Endbericht über die Ergebnisse der Vorprojektstudie  
von COSY MicroTec GmbH, Berlin und KfK zum Bau  
einer kompakten Synchrotronstrahlungsquelle für die  
Röntgentiefenlithographie im Kernforschungszentrum Karlsruhe**

zusammengestellt von

R. Klingelhöfer

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Endbericht über die Ergebnisse der Vorprojektstudie von COSY MicroTec GmbH, Berlin und KfK zum Bau einer kompakten Synchrotronstrahlungsquelle für die Röntgentiefenlithographie im Kernforschungszentrum Karlsruhe

---

### Zusammenfassung

Im Bericht KfK 3976 wurde der Entwurf einer Synchrotronstrahlungsquelle mit supraleitenden Ablenkmagneten beschrieben, die speziell für die Herstellung von Mikrostrukturen nach dem im KfK entwickelten LIGA-Verfahren konzipiert ist. In einer inzwischen von KfK und der Firma COSY MicroTec GmbH gemeinsam durchgeführten Vorprojektstudie wurden die detaillierten Planungsunterlagen und Kosten für die Synchrotronstrahlungsquelle erarbeitet. Die Ergebnisse der Vorprojektstudie sind im vorliegenden Bericht zusammengefaßt dargestellt. Sie bilden für KfK die Basis, gegebenenfalls den Antrag für die Bereitstellung der finanziellen Mittel für den Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle zu stellen.

Final report of a joint study of COSY MicroTec GmbH, Berlin and KfK on the construction of a compact light source for in depth lithography in the Nuclear Research Center Karlsruhe

---

### Abstract

The conceptual design of a Synchrotron light source with superconducting bending magnets and especially dedicated for the production of microstructures by the LIGA-process which has been developed in KfK is described in report KfK 3976.

Meanwhile KfK and COSY MicroTec GmbH jointly pursued a detailed study to provide for the basis of the construction and to estimate the expected cost of a synchrotron light source. The results of the study are described in this report. The results of the study enable KfK to apply for the amount of money necessary to build the synchrotron light source.

Die Vorprojektstudie entstand unter Mitwirkung von

Dr. Beißwenger	COSY MicroTec
Prof. Hagena	KfK
Dr. Henkes	KfK
Prof. Klingelhöfer	KfK
Dr. Krevet	KfK
Dr. Lehr	COSY MicroTec
Dr. Moser	KfK

Die im Auftrag von KfK während der Studie durch COSY MicroTec erstellten detaillierten Planungsunterlagen und Preisangaben sind in einem Anhang zu diesem Bericht enthalten, der im KfK eingesehen werden kann. Die Angaben zu den supraleitenden Magneten und zur Bahndynamik des Elektronenspeicherrings der Synchrotronstrahlungsquelle basieren hauptsächlich auf Vorarbeiten im KfK, teilweise in Zusammenarbeit mit ABB.

Das Hauptziel der Studie war, für KfK belastbare Unterlagen zu erarbeiten als Grundlage eines Antrags auf Bereitstellung der finanziellen Mittel für den Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle.

## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Planungszustand der Karlsruher Synchrotronstrahlungsquelle (KSSQ) bei Beginn der Vorprojektstudie im Oktober 1987	4
 <b>Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorprojektstudie</b>	
I Elektroneninjektion in den Elektronenspeicherring	8
II Periodischer Elektronenstrahlversatz in einem der Ablenkmagnete zur homogenen Ausleuchtung der Proben mit Synchrotronstrahlung	14
III Das Hochfrequenzsystem des Elektronenspeicherrings	16
IV Das Vakuumsystem des Elektronenspeicherrings	18
V Das Magnetsystem des Elektronenspeicherrings mit Ausnahme der SL-Magnete (SL bedeutet Supraleitung) und der Kippdipole für den Elektronenstrahlversatz	20
VI Das Kontrollsystem des Elektronenspeicherrings	21
VII Diagnostische Einrichtungen für den Elektronenstrahl	22
VIII Strahlenschutz	24
IX Positionierungsfragen	26
X Zusammenstellung der Gesamtinvestitionskosten für die Synchrotronstrahlungsquelle bzw. der aufzu- wendenden Kosten bei Herstellung einer be- triebsfertigen Strahlungsquelle durch die Industrie	28

## Planungszustand der KSSQ bei Beginn der Vorprojektstudie im Oktober 1987

Das Konzept der KSSQ wurde schon 1985 beschrieben<sup>1)</sup>; Fig. 1 zeigt das Schema des Elektronenspeicherrings für die KSSQ.

Die kompakte Bauweise wird durch den Einsatz supraleitender Ablenkmagnete (SL-Magnete) und die sogenannte Niederenergieinjektion (s. Abschnitt 4 dieses Kapitels) erreicht. Für die Auslegung der SL-Magnete wurde im KfK schon relativ viel Vorarbeit geleistet (s. z. B. Literaturverzeichnis<sup>2)</sup>). Die SL-Magnete sind deshalb nicht Bestandteil der vorliegenden Studie, während die Niederenergieinjektion mit relativ großem Aufwand behandelt wurde. Alle übrigen in der KSSQ vorgesehenen Komponenten und Verfahren konnten schon in der Konzeptphase als größtenteils lang erprobt und insgesamt als physikalisch und technisch abgesichert angesehen werden.

Zu Beginn der Vorprojektstudie stellten COSY MicroTec und KfK gemeinsam fest, daß bei der Studie von den im folgenden aufgelisteten Voraussetzungen ausgegangen werden kann:

1. Obwohl mit 2 x 180°-SL-Ablenkmagneten (SL = Supraleitung) der Speicherring grundsätzlich noch kompakter gebaut werden könnte, sollen 4 x 90°-SL-Ablenkmagnete wie in Fig. 1 verwendet werden, hauptsächlich deswegen, weil so eine größere Flexibilität der Strahlungsquelle gewährleistet ist. Insgesamt soll der Studie der nach Fig. 1 und Bericht KfK 3976 ausgelegte Ring zugrunde liegen.
2. Die aus physikalischen und aus technischen Gründen attraktive Wickeltechnik und Klammerung des SL-Drahtes der HERA-Magnete soll bei den vier 90°-Ablenkmagneten angewendet werden. Gestützt wird diese Entscheidung auf die Vorarbeiten im KfK und auf die erfolgreiche Herstellung einer Probewicklung für eine Spule aus NbTi-Draht (s. Fig. 2) durch ABB im Auftrag von KfK. Es wurde damit gezeigt, daß die an den neun Meter langen, kaum gekrümmten HERA-Magneten erprobte Wickel- und Ausbacktechnik auf die 1,84 m langen Magnete der KSSQ mit einem Krümmungsradius von 1,2 m übertragbar ist. Auf Grund der Angaben von ABB werden die Kosten der vier Ablenkmagnete incl. Kälteanlage und Netzgerät auf 4500 TDM geschätzt. Zur endgültigen Absicherung des Konzeptes der SL-Spulen für die KSSQ und der angegebenen Kosten wären der Bau und der Test eines Prototypmagneten anzustreben.

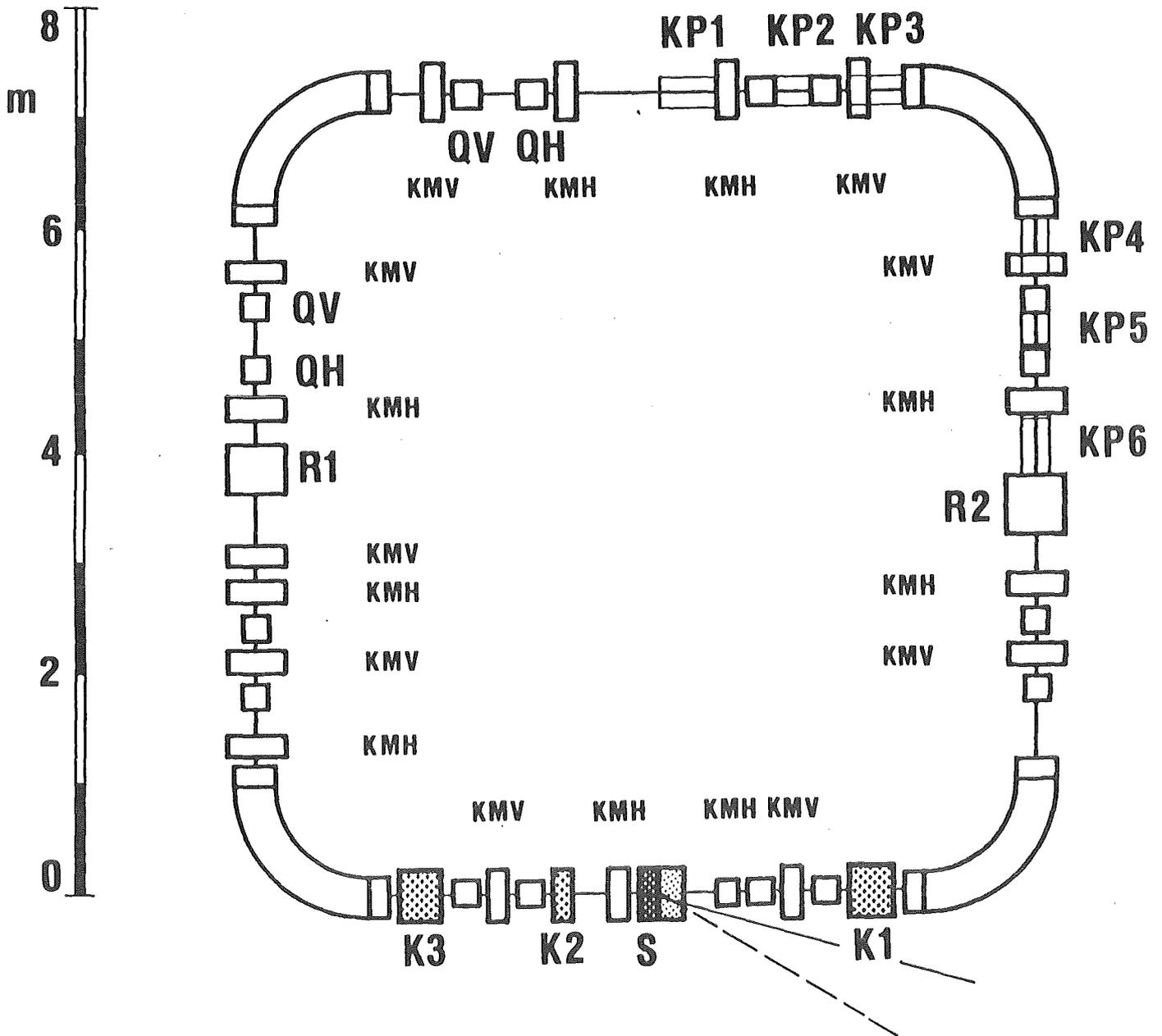


Fig. 1: Aufbau des Speicherrings.  
Q = Quadrupolmagnet  
KP = Kippmagnet

KM = Korrekturmagnet  
R = Resonator  
S = Septum

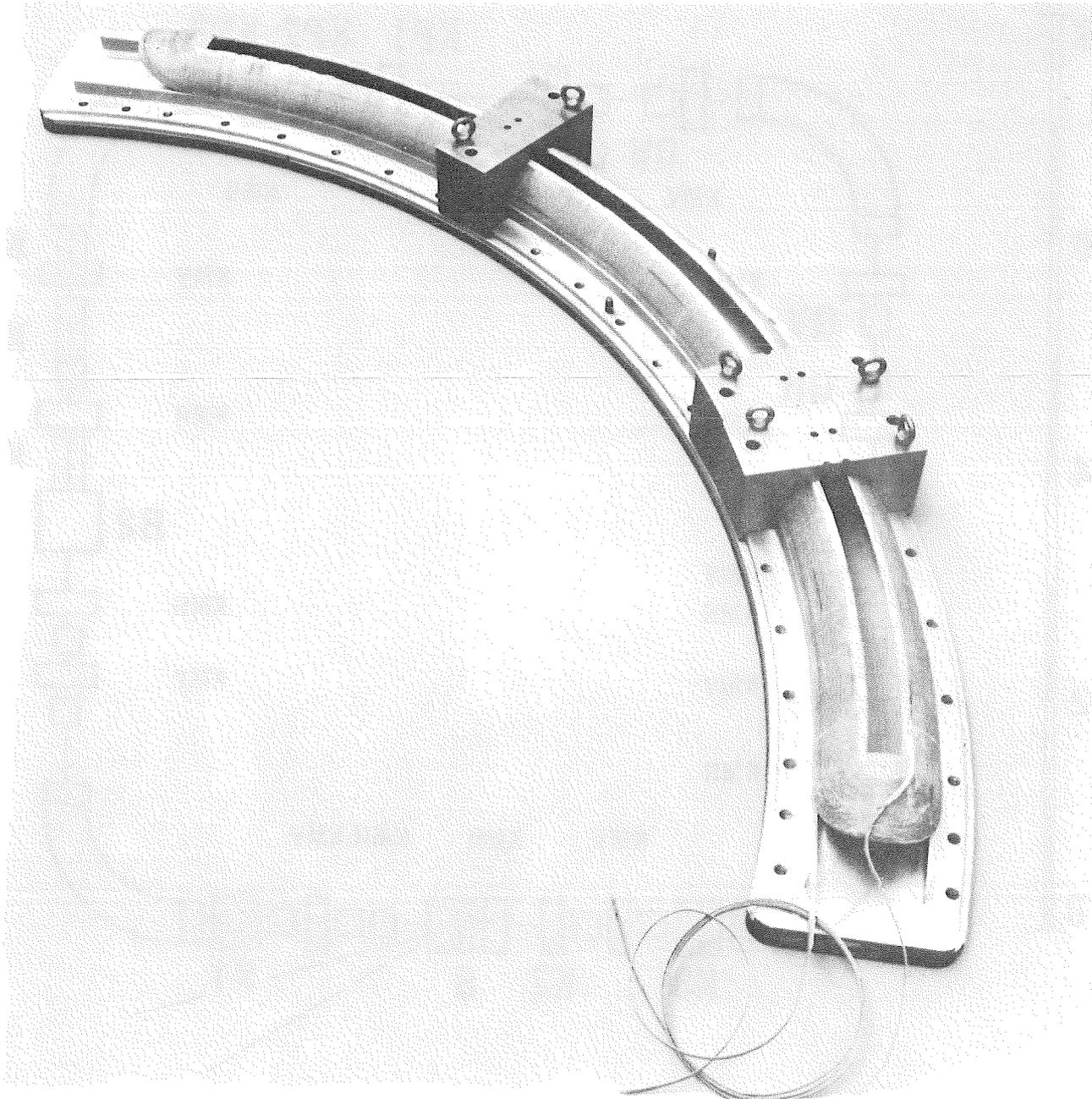


Fig. 2: NBTi-Draht-Probewicklung einer der Schalen, aus denen die Ablenkmagnete des Elektronenspeicherrings zusammengesetzt werden sollen.

3. Die verhältnismäßig stark gekrümmten SL-Magnete der KSSQ haben ein großes Verhältnis des Durchmessers der Bohrung zur Länge des Magneten verglichen mit den Ablenkmagneten einer entsprechenden Maschine, die mit Eisenmagneten ausgerüstet würde. Infolgedessen wird in der KSSQ ein stärkerer Einfluß der Endfelder der Ablenkmagnete auf die Elektronenbahnen erwartet als es der Fall wäre, wenn die Maschine mit Eisenmagneten konzipiert wäre. Inwieweit hierdurch ein Problem entsteht, wurde mathematisch untersucht. Benutzt wurde dabei ein zu diesem Zweck besonders angepaßtes Rechenprogramm, in dem die Ablagen der Elektronen und die Entwicklung des Feldes in der Umgebung der Sollbahn bis zur dritten Ordnung berücksichtigt wurden. (Normalerweise werden für die Behandlung der Bahndynamik lineare Programme ohne Berücksichtigung der Endfelder eingesetzt). Es stellt sich heraus, daß der Einfluß der Endfelder auf die dynamische Apertur elektronenoptisch beherrschbar sein sollte<sup>3</sup>).
4. Für die kompakte Bauweise ist es notwendig, die Elektronen mit einem die Gesamtabmessungen der Maschine möglichst wenig vergrößernden Injektor, d. h. u.a. auch mit einer gegen die Endenergie kleinen Energie zu injizieren. Ein zwischen den Injektor und den Speicherring geschaltetes booster-Synchrotron (was bei relativ hohen Stromstärken des gespeicherten Stromes üblich ist) muß im Interesse der Kompaktierung vermieden werden, und die Elektronen müssen deshalb mit den Resonatoren des Speicherrings auf Endenergie beschleunigt werden (Speicherring mit Niederenergieinjektion). In der Konzeptphase der KSSQ war zunächst noch nicht experimentell geklärt, bis zu welchen Werten der Stromstärke des gespeicherten Elektronenstromes ein Speicherring mit Niederenergieinjektion funktionieren würde. (Für die KSSQ wird eine Mindeststromstärke von 20 mA bei Endenergie anvisiert, 100 mA wäre ein komfortabler Wert). Inzwischen ist aber in zwei Speicherringen in Madison, USA und in Lund, Schweden gezeigt worden, daß die Niederenergieinjektion bis zu gespeicherten Strömen von 200 mA und 160 mA resp. bei Endenergie möglich ist. Auch in COSY, Berlin wurden 90 mA zumindest bei der Injektionsenergie von 50 MeV eingefangen.

Die Maschine in Lund ist zudem in der Auslegung der KSSQ sehr ähnlich. Das Funktionieren eines Speicherrings mit Niederenergieinjektion wird deshalb für die KSSQ als grundsätzlich experimentell gesichert betrachtet, wiewohl auf diesem Gebiet noch Entwicklungsarbeit zu leisten ist. Weil

sich bei den Versuchen in Lund zeigte, daß der speicherbare Strom relativ stark sinkt, wenn die Injektionsenergie unter den Nennwert des Injektors von 100 MeV herabgesetzt wird (in Madison wurden ähnliche Erfahrungen gemacht), wird für die KSSQ, um auf der sicheren Seite zu liegen, eine Injektionsenergie von 150 MeV vereinbart.

## Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorprojektstudie\*)

### I. Elektroneninjektion in den Elektronenspeicherring

#### 1. Stand der Technik auf dem Gebiet der Niederinjektion in Elektronenspeicherringe

Bisherige Erfahrungen mit der Niederenergieinjektion bei den Speicherringen Aladdin, Madison, USA, MAX, Lund, Schweden und COSY, Berlin zeigen, daß in Folge von Ioneneffekten die Akkumulierung des gespeicherten Strahls stark behindert wird. Oberhalb einer speicherringabhängigen Stromschwelle gelingt es nicht mehr ohne zusätzliche Maßnahmen, den gespeicherten Strom zu erhöhen. Durch die Montage von "Absaugelektroden" und das Anlegen eines rechtwinklig zum Elektronenstrahl gerichteten elektrischen Feldes erhöht sich der gespeicherte Strom. Eine weitere Steigerung gelingt z. B. bei Aladdin durch das Anlegen einer Wechselspannung fester Frequenz an die Elektroden, womit die Ionen weitgehend vom Elektronenstrahl "abgeschüttelt" werden können. In diesem Sinne sind auch Ergebnisse des MAXLAB, Lund interpretierbar. Ähnliche Erfahrungen wurden bei COSY gemacht.

Bei allen drei Ringen traten während der Einfahrphase bisher unbekannte Probleme auf, die eine schnelle Inbetriebnahme verzögerten. In jeder der drei Maschinen war man auf die **Akkumulierung** der Elektronen durch ein ent-

---

\*) Ein Anhang zu diesem Übersichtsbericht enthält die von COSY MicroTec GmbH erstellten, ausführlichen und vertraglich vereinbarten Detailberichte zu den neun im Inhaltsverzeichnis aufgezählten Themen, deren Hauptaussagen hier kurz zusammengestellt werden. Nach Meinung der Vertragspartner ist der Inhalt der Berichte zusammen mit den im KfK schon vorher erarbeiteten Unterlagen für die SL-Magnete und zur Bahndynamik im Sinne des eingangs beschriebenen Vertragsziels vollständig. Die Ungenauigkeit der angegebenen Kosten wird auf ca. 10 % geschätzt. In den Berichten und in den Kosten wurden Zusatzeinrichtungen, die außerhalb der Synchrotronstrahlungsquelle zur Bestrahlung der Proben (z. B. Strahlrohre) gebraucht werden und Gebäude und Fundamente nicht berücksichtigt.

sprechendes Injektionsschema angewiesen, da die Pulsströme der jeweiligen Vorbeschleuniger von etwa 10 bis 15 mA bei einer Injektionseffizienz von wenigen Prozenten nur bei Akkumulationsbetrieb einen genügend hohen Strom im Speicherring ermöglichen. Bis heute ist nicht verstanden, wie Ioneneffekte die Injektionseffizienz beeinflussen. Vermutet wird ein Wechselwirkungsmechanismus zwischen dem gespeicherten Strahl, dem injizierten Strahl und den Ionen.

Bisher wurde nicht systematisch ausgetestet, inwieweit ein **single-shot**-Modus unter Zuhilfenahme eines Injektors ausreichender Pulsstärke diese mühsame Einfahrprozedur verkürzen könnte. Anzumerken ist hierzu, daß bei den ersten Einschußversuchen in den normalleitenden Kompaktspeicherring COSY bei einem Mikrotronstrom von etwa 30 mA immerhin im single-shot-Modus 10 mA leicht zu speichern waren. Andere Messungen am BESSY-Synchrotron, das einen 20 MeV Mikrotron-Injektor besitzt und dessen Injektion im single-shot-single-turn-Modus betrieben wird, zeigen, daß trotz ungünstiger closed-orbit-Korrekturen von etwa 20 mA injiziertem Strom bei 20 MeV Einschußenergie immerhin bis zu 15 mA bei 800 MeV nach dem Beschleunigungszyklus extrahiert werden können.

Während ein Racetrack-Mikrotron lediglich zur Injektion mittels Akkumulierung herangezogen werden kann, kann ein Linac wegen seines 10fach höheren Pulsstroms (siehe Tabelle I.1) auch zu einer single-shot-Injektion (single-turn oder multi-turn) eingesetzt werden. Dies hätte den zusätzlichen Vorteil zeitlich sehr kurzer Injektionsphasen.

Nominell besitzt das Racetrack-Mikrotron eine wesentliche bessere Emittanz und eine geringere Energieunschärfe (Tabelle I.1). Jedoch muß angezweifelt werden, daß diese Werte im praktischen Betrieb, bedingt durch die kritischen Einstellparameter des Racetrack-Mikrotrons, routinemäßig erreicht werden können. Außerdem ist die Speicherringakzeptanz auch für einen Linac-Injektor genügend groß.

Tabelle I.1 zeigt einen Vergleich von Racetrack-Mikrotron und Linac bzgl. einiger physikalischer Kenndaten.

Der Platzbedarf von Racetrack-Mikrotron und Linac ist ähnlich groß, wie Fig. I-1 und I-2 zeigen. Das Mikrotron selbst ist zwar etwas kompakter als der Linac, braucht aber als Kreisbeschleuniger grundsätzlich eine etwas stärkere Abschirmung als der Linac, so daß der Flächenbedarf beider Injektoren vergleichbar ist.

Eine ausführliche Beschreibung der beiden Injektortypen mit den zugehörigen Einschubverfahren findet man im Anhang AI.

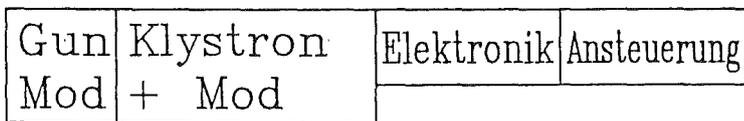
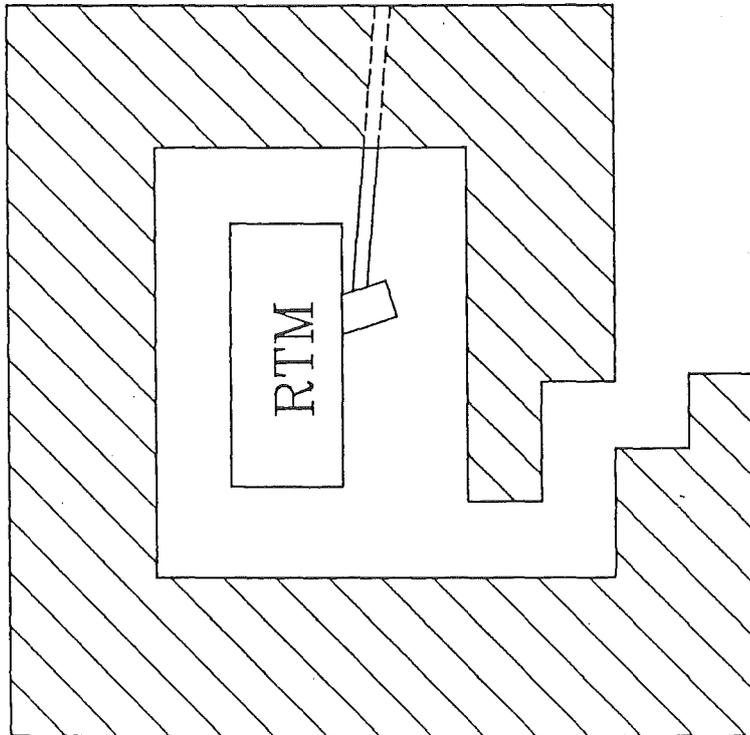
## 2. Kosten

COSY MicroTec hat für die Lieferung eines 150 MeV Racetrack-Mikrotrons bei Scanditronix, Uppsala und für die Lieferung eines 150 MeV Linacs bei CGR MeV, Buc, Frankreich ein Angebot eingeholt. Die Lieferzeiten werden vergleichbar mit knapp zwei Jahren angegeben, die Kaufpreise (s. Anhang AI) mit

5500 TDM für ein Racetrack-Mikrotron  
und  
7700 TDM für einen Linac.

	Linac		Racetrack-Mikrotron
	Garantie	Design	Design
Energie [MeV]	150	150	150
$I_{\max}$ [mA]	50	200	10
Emittanz [m · rad]	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\delta E/E$ (rms) [%]	1	2	0.14
Pulslänge [ $\mu$ sec]	0.1	0.2	0.05-5
HF-Frequenz [GHz]	3	3	3
Wiederholrate [Hz]	10	10	10

Tabelle I.1: Vergleich der Strahlparameter Linac-Racetrack-Mikrotron nach Angaben CGR MeV/Scanditronix.



┌──────────┐  
2m

Fig. I-1: Racetrack-Mikrotron mit Strahlenschutzmauer, Gehäuse für Gun-Modulator, Klystron und Klystron-Modulator, Kontrollelektronik und Computer Ansteuerung.

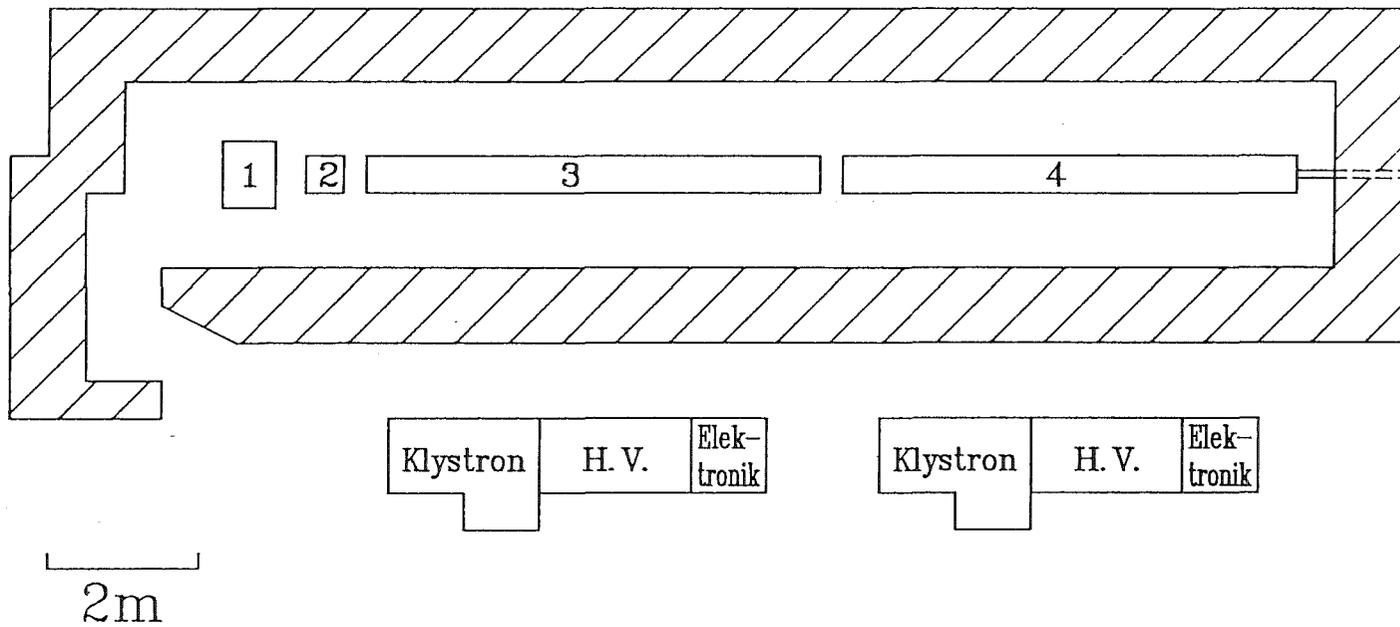


Fig. 1-II: Linac Tunnel mit Strahlenschutzmauer, Klystrongehäuse, H.V. Versorgung und Ansteuerungselektronik außerhalb.  
 1: gun; 2: Buncher; 3, 4: Beschleunigungsstrukturen.

Um abzuschätzen, wie groß der Aufwand ist, wenn der Injektor im KfK gebaut wird und nur die Komponenten gekauft werden, wurde von zwei Experten, Prof. Eriksson, Universität Lund und Prof. Stange, früher DESY, Hamburg eine Schätzung erbeten mit dem Ergebnis

Typ	Investitionen	Arbeitsaufwand
Racetrack-Mikrotron	1500 TDM	3-5 Mannjahre
Linac	1450 TDM	11 Mannjahre

Die Schätzwerte sind in diesem Fall jeweils für 100 MeV-Maschinen angegeben.

### 3. Zusammenfassung

Vergleicht man die beiden Injektortypen, so ergeben sich folgende Vorteile für das Mikrotron:

Bei den bisher mit Niederinjektion betriebenen Elektronenspeicherringen sind ausschließlich Mikrotrons eingesetzt worden. Die dort bei Endenergie erreichten Stromstärken des gespeicherten Elektronenstromes genügen bei weitem den KfK-Anforderungen.

Die Emittanz eines Mikrotrons ist kleiner als die eines Linacs.

Nach den vorliegenden Angaben scheint sich ferner beim Kauf eines Injektors ein Kostenvorteil gegenüber dem Linac zu ergeben.

Für einen Linac sprechen folgende Argumente:

Es ist zu vermuten, daß an einem gekauften Injektor mit den hier geforderten Eigenschaften, gleichgültig welchen Typs während der Einfahrphase des Speicherrings Probleme auftauchen, die eine weitere Entwicklungsarbeit erforderlich machen bis die gesamte Maschine zuverlässig läuft. In dieser Phase sollte die verglichen mit Mikrotrons lange Entwicklungszeit von Jahrzehnten des Linacs zusammen mit dem dabei erreichten hohen technischen Entwicklungsstand von Vorteil sein.

Sollte sich ferner eine höhere Injektionsenergie als 150 MeV als erstrebenswert herausstellen, so ist eine Nachrüstung beim Linac wegen der hintereinander geschalteten Beschleunigungsstrecken möglich, beim Mikrotron hingegen nicht.

Der eingangs erwähnte single-shot-Modus, der noch nicht systematisch ausgetestet ist, wäre wegen seiner relativ hohen Stromstärken nur mit einem Linac möglich.

Vom Platzbedarf scheinen die beiden Injektoren gleichwertig zu sein.

Insgesamt scheint es unter diesen Voraussetzungen z.Z. nicht sinnvoll, sich auf einen der beiden Injektortypen festzulegen, vielmehr wird man abhängig von der weiteren Entwicklung der Geräte zum gegebenen Zeitpunkt die dann am günstigsten erscheinende Version auswählen. Die Entscheidung wird u.a. auch davon abhängen, mit welchem Personal- und Mitteleinsatz gearbeitet werden kann.

## **II. Periodischer Elektronenstrahlversatz in einem der Ablenkmagnete zur homogenen Ausleuchtung der Proben mit Synchrotronstrahlung**

### **1. Begründung für den Elektronenstrahlversatz und Randbedingungen für die technische Auslegung der magnetischen Kippanordnung für die Elektronen**

Da die Elektronen und gleichzeitig das von ihnen in ihrer Flugrichtung emittierte schlanke Strahlungsbündel mit einem Öffnungswinkel von  $0,35$  mrad bei jedem Umlauf in den Ablenkmagneten um  $90^\circ$  umgelenkt werden, wird eine Probe in ca.  $10$  m Entfernung automatisch längs eines etwa  $7$  mm breiten Streifens horizontal ausgeleuchtet. Weil die Proben typischerweise Quadrate von größenordnungsmäßig  $10^{-1}$  m Seitenlänge sind, müssen sie zur homogenen Ausleuchtung ihrer gesamten Oberfläche entweder vertikal bewegt werden oder der Elektronenstrahl muß in vertikaler Richtung periodisch gekippt werden. In dem Konzept nach Fig. 1 wurde die aus technischen Gründen vorzuziehende Lösung, den Elektronenstrahl zu kippen, eingeplant. Vorgegeben durch die thermische Belastungsgrenze wurde festgelegt, die Proben analog einem Fernsehschirm mit einer Kippfrequenz von  $10^2$  s $^{-1}$  für die vertikale Auslenkung des Elektronenstrahls zu überschreiben.

## 2. Auslegung der vertikalen Kippanordnung

Für die Auslenkung der Elektronen sind je drei Dipole vor und hinter einem der supraleitenden 90°-Ablenkmagnete vorgesehen (s. Fig. 1). Falls der Durchstoßpunkt durch die Soll-Bahnebene im 90°-Ablenkmagneten bei 45° liegt, ergeben sich für die Kippmagnete KP 1 bis KP 3 unter Einbeziehung der elektronenoptischen Parameter folgende integralen Feldwerte:

Kippmagnet	$B \cdot l$ [Tesla · m]	$B$ = Flußdichte im Magneten $l$ = Länge des Magneten
KP 1	0.0264	
KP 2	- 0.01706	
KP 3	0.02214	

Infolge der Symmetrie der Anordnung entsprechen die angegebenen Werte denen der Magnete KP 4 bis KP 6. Ziel der Anordnung ist es, mit hoher Präzision einen proportionalen Gleichlauf der 6 Magnetfelder im gesamten Anregungsbereich zu erreichen, so daß die Elektronen nur im dafür vorgesehenen SL-Ablenkmagneten ausgelenkt werden und die Synchrotronstrahlung eine homogene Flächenausleuchtung erzeugt. Ein dynamischer Fehlabgleich würde zu zusätzlichen Bewegungen der Elektronen, insbesondere auch außerhalb des gewünschten Bereiches führen, so daß im Zeitmittel daraus eine Vergrößerung des Quellpunktes der Synchrotronstrahlung resultiert.

In dem Detailbericht A II im Anhang werden die Auslegung der Einzelkomponenten, d. h. der Kippmagnete, der Netzgeräte und der Ansteuerung sowie der Vakuumkammer dargestellt. Besonderer Wert wird auf eine hohe Gleichlaufpräzision der sechs Kippfelder gelegt.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß sich die Unterkomponenten der periodisch arbeitenden Kippeinheiten so auslegen lassen, daß selbst bei der relativ hohen Ablenkfrequenz von 100 Hz und einer bipolaren Dreiecksanregung ein genügend guter Gleichlauf der separaten Einheiten möglich wird. Wesentlich dafür ist die zeitlich korrekte Ansteuerung der Unterkomponenten. Dazu sind bei BESSY Funktionsgeneratoren entwickelt worden, die kommerziell nicht verfügbar sind aber über COSY-MicroTec bezogen werden können.

### 3. Kosten

Die Preise für die einzelnen Komponenten sind in Anhang A II aufgeführt. Die Gesamtinvestitionssumme beträgt

340 TDM

Eine Verbilligung auf etwa 2/3 dieses Wertes ist möglich, wenn die Kippfrequenz von  $100 \text{ s}^{-1}$  auf  $20 \text{ s}^{-1}$  herabgesetzt werden könnte.

## III Das Hochfrequenzsystem des Elektronenspeicherrings

### 1. Anforderungen an das Hochfrequenzsystem und Auslegung

Die im Speicherring umlaufenden Elektronen verlieren durch die Emission von Synchrotronstrahlung in den Ablenkmagneten Energie, die durch das Hochfrequenzbeschleunigungssystem ergänzt wird. Der mittlere Energieverlust eines Elektrons pro Umlauf steigt proportional mit der vierten Potenz der kinetischen Energie der Elektronen. Bei einer Einschubenergie von 150 MeV und einem mittleren Strahlstrom von 100 mA ist der Leistungsbedarf 3.9 W. Bei demselben Strahlstrom und einer Endenergie von 1.44 GeV beträgt die Leistungsanforderung an die HF-Beschleunigungsstrecke 73.5 kW. Dies verdeutlicht, daß die Einstellparameter des HF-Systems in weiten Grenzen variiert werden müssen.

Die Wahl der HF-Frequenz richtet sich nach folgenden Kriterien:

- Die Abmessungen der Hohlraumresonatoren sollten möglichst klein sein.
- Die Touschek-Lebensdauer sollte hinreichend lang sein. Sie wächst mit der Wurzel der HF-Frequenz. (Die Elektronenverluste durch Coulombwechselwirkung untereinander werden als Touschek-Effekt bezeichnet).
- Der Resonanzwiderstand pro Längeneinheit der HF-Resonatoren sollte hinreichend groß sein. Er wächst mit der Wurzel der HF-Frequenz.
- Die Hohlraumresonatoren und die HF-Sender relativ hoher Leistung sollten leicht verfügbar sein.

Die ersten drei Punkte begünstigen eine hohe HF-Frequenz. Des weiteren zeigt es sich, daß Hohlraumresonatoren mit einer Resonanzfrequenz von etwa 500

recht gut verfügbar sind. Außerdem ist diese Frequenz bei DESY und BESSY eingeführt, so daß im Sinne einer kostengünstigen Anlage alle Regelsysteme entweder direkt bei DESY bezogen oder unter Zuhilfenahme von fertigen Platinen leicht nachgebaut werden können.

Die vom HF-Sender gelieferte Leistung wird im Hohlraumresonator teilweise in Wärme umgesetzt und als Strahlleistung zur Deckung der Synchrotronstrahlungsverluste weitergegeben. Die Verlustleistung  $P_c$  und der Energiegewinn beim Durchlaufen eines Resonators dienen zur Definition der Shunt-Impedanz  $R_s = V_c^2/P_c$ . Für den gesamten Leistungsbedarf bei einem Strahlstrom  $I$  und der Resonator-Spannung  $V_c$  gilt für die HF-Leistung  $P_{HF}$ :

$$P_{HF} = V_c^2 / R_s + I \cdot V_c \cdot \sin \phi_s$$
$$\phi_s = \text{Synchrotronphasenwinkel}$$

Bei einem supraleitenden Resonator kann die HF-Leistung des Senders ohne nennenswerte Verluste praktisch vollständig in Strahlleistung umgesetzt werden. Bei normalleitenden Hohlraumresonatoren ist man bestrebt, den dissipativen Anteil (erster Ausdruck in  $P_{HF}$ ) möglichst klein zu halten, so daß eine hohe Shunt-Impedanz  $R_s$  erwünscht ist. Obwohl vom Standpunkt des HF-Energiewirkungsgrades ein supraleitender Resonator vorzuziehen wäre, wird für die erste Ausbaustufe ein dreizelliger normalleitender Hohlraumresonator mit einer Shunt-Impedanz von  $R_s = 18 \text{ M}\Omega$  empfohlen. Der Resonator wurde für DESY I entwickelt, ist relativ preisgünstig zu beschaffen und kann durch geringfügige Änderungen an die KSSQ angepaßt werden.

Der Gesamtleistungsbedarf des Hochfrequenzsystems ist bei dieser Auslegung mit 100 mA Elektronenstrom 130 kW.

Die detaillierte Beschreibung des Resonators mit seinem Hochfrequenzsystem und möglichen Instabilitäten durch Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl findet man im Anhang A III.

## 2. Kosten

Die Preise für die einzelnen Komponenten sind im Anhang A III aufgeführt. Die Gesamtinvestitionssumme beträgt

## IV Das Vakuumsystem des Elektronenspeicherrings

### 1. Anforderungen an das Vakuumsystem

Einer der Hauptgründe für die Begrenzung der Lebensdauer der Elektronen in einem Speicherring ist die Wechselwirkung der Elektronen mit den Restgasmolekülen. Dabei handelt es sich um folgende Prozesse:

- Elastische Streuung an den Atomkernen der Restgasmoleküle.
- Energieverlust durch Bremsstrahlung der Speicherringelektronen an Restgasatomkernen.
- Elastische Streuung an Hüllenelektronen.
- Inelastische Streuung an Hüllenelektronen.

Ein zusätzlicher Prozeß entsteht durch eine teilweise Ionisierung der Restgasmoleküle. Die positiv geladenen Ionen sammeln sich am Ort des Elektronenstrahls und bewirken dort eine effektive Restgasdruckerhöhung, die über die obigen Wechselwirkungsmechanismen zu einer erhöhten Verlustrate führt. Berechnungen zu Streuraten und der daraus resultierenden Strahllebensdauer sind im Anhang A IV durchgeführt.

Das allgemeine Ziel bei der Auslegung des Vakuumsystems von Speicherringen ist, den Restgasdruck unter Berücksichtigung von Kostenfaktoren möglichst gering zu halten, wobei folgende Entwurfskriterien im Vordergrund stehen:

- Die Strahllebensdauer sollte von der Größenordnung einiger Stunden sein.
- Nach Öffnen der Maschine sollten beim Schließen möglichst schnell wieder gute Vakuumbedingungen erreichbar sein.

Diese Anforderungen bestimmen den Wert des gesamten zu installierenden Saugvermögens und die Verteilung der Pumpen. Zu berücksichtigen ist hierbei, daß für die Erzeugung von Restgasmolekülen im wesentlichen zwei Prozesse verantwortlich sind:

- Thermisches Ausgasen der Vakuumkammerwände
- Desorption von Restgasmolekülen durch Synchrotronstrahlung.

Infolge der geringen Synchrotronstrahlungsleistung ist bei der Injektionsenergie der zweite Effekt vernachlässigbar. Da jedoch der bei kleinen Strahlenergien relevante Verlustmechanismus (Coulombstreuung) stark von der Energie des gespeicherten Strahls abhängt, darf dort die thermische Ausgasrate keineswegs vernachlässigt werden, sondern sie muß durch Materialwahl, Oberflächenvorbehandlung und Ausheizung des Vakuumsystems minimiert werden.

## 2. Erreichbare Elektronenstromstärken im Speicherring

Es ist auf Grund der Erfahrungen an anderen Maschinen zu erwarten, daß beim Injizieren der Elektronen, d. h. bei relativ niedriger Energie, bei der die Bildung von Gasionen im wesentlichen die Lebensdauer der Elektronen bestimmt, durch bekannte Maßnahmen zur Absaugung der Ionen eine für die Praxis ausreichende Lebensdauer des akkumulierten Stroms, der bei Endenergie eine Stromstärke von 100 mA haben soll, erreicht wird. Voraussetzung hierfür ist ein mittlerer Restgasdruck von nicht mehr als  $10^{-9}$  Torr. Man kann heute noch nicht sagen, welcher Anteil der Vakuumkammer mit Absaugelektroden ausgestattet werden muß, um die am Restgas gebildeten Ionen in ausreichendem Maße zu beseitigen.

Daß die Restgasionen bei Niederenergieinjektion und Beschleunigung der Elektronen auf Endenergie mit den Resonatoren des Rings die Größe des akkumulierbaren Stromes entscheidend begrenzen, ist erst seit mehreren Jahren bekannt. Ebenso die Gegenmaßnahme in Form der Absaugelektroden. Die Kenntnisse über den Mechanismus, durch den die Ionen abgesaugt oder auch "abgeschüttelt" werden, sind noch unzureichend. In der Maschine in Madison mit ca. 80 m Umfang sind mehr als 50 % des Umfangs mit Absaugelektroden belegt, bei COSY (9 m Umfang) etwa 0,5 m.

Wegen der bei Endenergie zu erwartenden Desorption ist zu erwarten, daß erst nach einer Stromdosis von etwa  $1 \text{ A} \cdot \text{h}$  mit einer Lebensdauer von 4 h eines gespeicherten Elektronenstrahls von 100 mA zu rechnen ist.

### 3. Kosten

Im Anhang A IV findet man die Auslegung aller Komponenten des Vakuumsystems zusammen mit einer Kostenzusammenstellung.

Die Gesamtinvestitionskosten für das Vakuumsystem werden mit

850 TDM

angegeben.

#### V Das Magnetsystem des Elektronenspeicherrings mit Ausnahme der SL-Magnete und der Kippdipole für den Elektronenstrahlversatz

##### 1. Zusammenstellung der konventionellen Magnete des Speicherrings und ihrer Funktionen mit Ausnahme der Kippdipole, die schon in II besprochen wurden

Da der Geschwindigkeitsvektor der Elektronen stets Komponenten hat, die zum Verlassen der Sollbahn führen würden, braucht man elektronenoptische Elemente, mit denen die Elektronen immer wieder zur Sollbahn hin fokussiert werden. Diese Aufgabe übernehmen zwei Gruppen von Quadropolmagneten für die Fokussierung innerhalb der Sollbahnebene und rechtwinklig zur Sollbahnebene.

Ferner weicht die wirklich durchlaufene Umlaufbahn der Elektronen in der Regel von der geplanten Sollbahn ab, z. B. bedingt durch Aufstellungsfehler der Fokussierungsmagnete. Um entsprechende Korrekturen vornehmen zu können, werden Dipolmagnete eingesetzt ebenfalls für Korrekturen innerhalb der Sollbahnebene und rechtwinklig dazu.

Während die Elektronen in den Ablenkmagneten statistisch Röntgenquanten emittieren, kommt es zu einer statistischen Verbreiterung ihrer kinetischen Energie, was zu einer Verbreiterung der Frequenz führt, mit der die Elektronen um die Sollbahn oszillieren. Damit entsteht ein "chromatischer" Fehler der Elektronenoptik des Rings, gekennzeichnet durch die Chromatizität  $d\nu/\nu: dE/E$  ( $\nu$  = Betatronfrequenz,  $E$  = kinetische Energie der Elektronen). Die Chromatizität läßt sich mit einer dritten Gruppe von Magneten, den Sextupolmagneten kompensieren. Die Sextupolmagnete dienen außerdem zur Unterdrückung einer bestimmten Instabilität des Elektronenstrahls.

Wie bei den anderen Komponenten des Speicherrings wurde auch bei der detaillierten Auslegung der Quadrupol-, Sextupol- und der Korrekturmagnete samt der zugehörigen Netzgeräte in Anhang A V auf erprobte Entwürfe zurückgegriffen.

## **2. Kosten**

Die detaillierte Kostenaufstellung der in diesem Abschnitt behandelten Magnete findet man im Anhang A V.

Die Gesamtinvestitionssumme beträgt

1476 TDM.

## **VI Das Kontrollsystem des Elektronenspeicherrings**

### **1. Zusammenfassung**

Das Konzept zur Kontrolle der KSSQ basiert auf einem modernisierten Maschinenkontrollsystem, das nach den bei BESSY gesammelten Erfahrungen z.Z. bei COSY eingesetzt wird. Charakteristisch für den Aufbau des Kontrollsystems ist, daß die Vielzahl der von einem Computer zu erfüllenden Aufgaben auf eine große Anzahl von parallel arbeitenden Mikrocomputern verteilt wird, die alle weitgehend unabhängig voneinander arbeiten.

Wesentliche Vorteile dieses Aufbaus sind eine hohe Zuverlässigkeit, weil bei entsprechender Auslegung keine Schlüsselkomponenten existieren, deren Fehlverhalten zu einem Totalausfall des Gesamtsystems führen könnten und, daß die Parallelschaltung die Verarbeitungsgeschwindigkeit wesentlich unabhängiger von der Anzahl der konkurrierenden Prozesse macht als bei zentralen Systemen.

Die modulare Struktur des Multi-Prozessornetzwerks erlaubt außerdem eine größtmögliche Flexibilität und Anpassung an zukünftige Entwicklungen. Durch die Einführung und Erprobung dieses Systems bei COSY und BESSY dürften die "Kinderkrankheiten" bei einem Einsatz in der KSSQ schon beseitigt sein. Bei einer etwaigen Auftragsvergabe empfiehlt es sich, den Gesamtauftrag über Hard- und Software an die jeweilige Industriefirma zu vergeben, da zum einen

dabei eindeutige Haftungsvorschriften gewährleistet sind und zum anderen Institute wie z. B. BESSY keine Entwicklungsaufträge übernehmen können.

Die Komponenten des Kontrollsystems sind im Anhang A VI beschrieben.

## **2. Kosten**

Die detaillierte Kostenaufstellung des Kontrollsystems findet man im Anhang A VI.

Die Gesamtinvestitionssumme beträgt

782 TDM.

## **VII Diagnostische Einrichtungen für den Elektronenstrahl**

### **1. Übersicht**

Die Betriebssicherheit einer Speicherringanlage wird wesentlich durch die Messung und Quantifizierung der Strahlparameter beeinflusst. Insbesondere bei Ausfällen einzelner Speicherringkomponenten bestimmt die einwandfreie Dokumentation der Strahlmeßgrößen die Zeitdauer der Fehleranalyse und somit die Dauer der Ausfallzeit. Zur Charakterisierung eines Speicherrings und der jeweiligen Speicherringoptik erweist es sich als zweckmäßig, eine Grundmenge von Meßgrößen zu bestimmen. Die Kenntnis der Meßwerte und deren Reproduktion durch Korrekturmaßnahmen erlaubt es, für den Synchrotronstrahlungsnutzer reproduzierbare Verhältnisse zu erhalten.

Die wichtigsten Speicherringgrößen und Meßverfahren sind in Tab. VII-1 zusammengestellt. Die detaillierte Beschreibung der Meßverfahren findet man im Anhang A VII.

<b>Allgemeine Meßgröße</b>	<b>Spezifische Meßgröße</b>	<b>Meßverfahren</b>
<b>Strahlposition</b>	Einschuß, Einschußverhalten	Szintillator, Pickup, Oszillograph
	Gleichgewichtsortbit	Pick-up-Monitoren
<b>Strahlintensität</b>	Absolutmessung (Strom)	Strommonitor
	Zeitverhalten (Strahllebensdauer)	Strommonitor
<b>Strahloptik</b>	Arbeitspunkte	Anregung, Frequenzanalysator
	Betafunktionen	Variation der K-Werte Arbeitspunktmessung
	Dispersionsfunktion	Frequenzänderung C.O.-Messung
	Chromatizität	Frequenzänderung und Arbeitspunktmessung
<b>Emittanz</b>	Transversal	Synchrotronstrahlungsmonitor
	Longitudinal (Bunchlänge)	Analyse Pick-up-Signal
<b>Strahlprofil</b>	Dichteverteilung	Scraper
<b>HF</b>	Synchrotronseitenbänder	Frequenzanalysator
<b>Instabilitäten</b>	Charakteristische Anregungslinien	Frequenzanalysator

Tab. VII-1: Die wichtigsten Kenngrößen eines Speicherrings mit Meßverfahren.

## 2. Kosten

Die Kosten für die einzelnen Komponenten der diagnostischen Einrichtungen sind in Anhang A VII zusammengestellt.

Die Gesamtinvestitionssumme beträgt

371 TDM.

## VIII Strahlenschutz

### 1. Zusammenfassung der am Speicherring und am Injektor notwendigen Abschirmeinrichtungen

Die maximale Strahlungsintensität wird bei Speicherringen während der Injektionsphase erreicht. Schlimmstenfalls tritt der volle Strahlverlust des zu injizierten Strahls an einer Stelle auf. Das kann im Transferweg oder im Speicherring (hauptsächlich im Ablenkmagneten) der Fall sein. Immer tritt jedoch auch Strahlverlust, zumindest teilweise, am Septummagneten auf. Die höchsten Dosen zeigen sich in der Einfahrphase oder nach Reparaturen der Maschine. Ansonsten wird im Normalbetrieb nur nach mehrstündigem Speicherringbetrieb neu injiziert, so daß die Einschaltzeit für die Injektionsphase wesentlich kleiner ist als die Wochenarbeitszeit.

In Fig. VIII-1 ist maßstabgerecht eine Gesamtaufsicht von Speicherring und Injektor einschließlich der Strahlenschutzmauern dargestellt. Der Speicherring wird von Barytbetonquadern der Dicke 0,7 m und einer Dichte von  $3,3 \text{ g/cm}^3$  umbaut. Entlang der Einschußgeraden und um den ersten Dipolmagneten ist die Mauer auf 1 m verstärkt. Das Racetrack-Microtron wird mit einer 1 m dicken Barytbetonmauer mit einem Zugangslabyrinth umbaut und erhält eine Decke. Erfahrungen mit dem Microtron RTM 50 der Firma Scanditronix zeigen, daß in Richtung des Transportweges die Streustrahlung ein Maximum erreicht. Aus diesem Grund sollte dort die Mauerdicke auf 1,50 m erhöht werden.

Während des Betriebs ist der Bereich innerhalb der Mauer Sperrbereich, der Experimentierbereich kann für die Dauer des Probetriebes zum Kontrollbereich gemacht werden. Während des Probetriebes wird durch entsprechende Ortsdosisleistungsmessungen z. B. mit Lithiumfluorid-Thermolumineszenzdosimetern, der Nachweis erbracht, daß der Experimentierbereich im endgültigen Betrieb

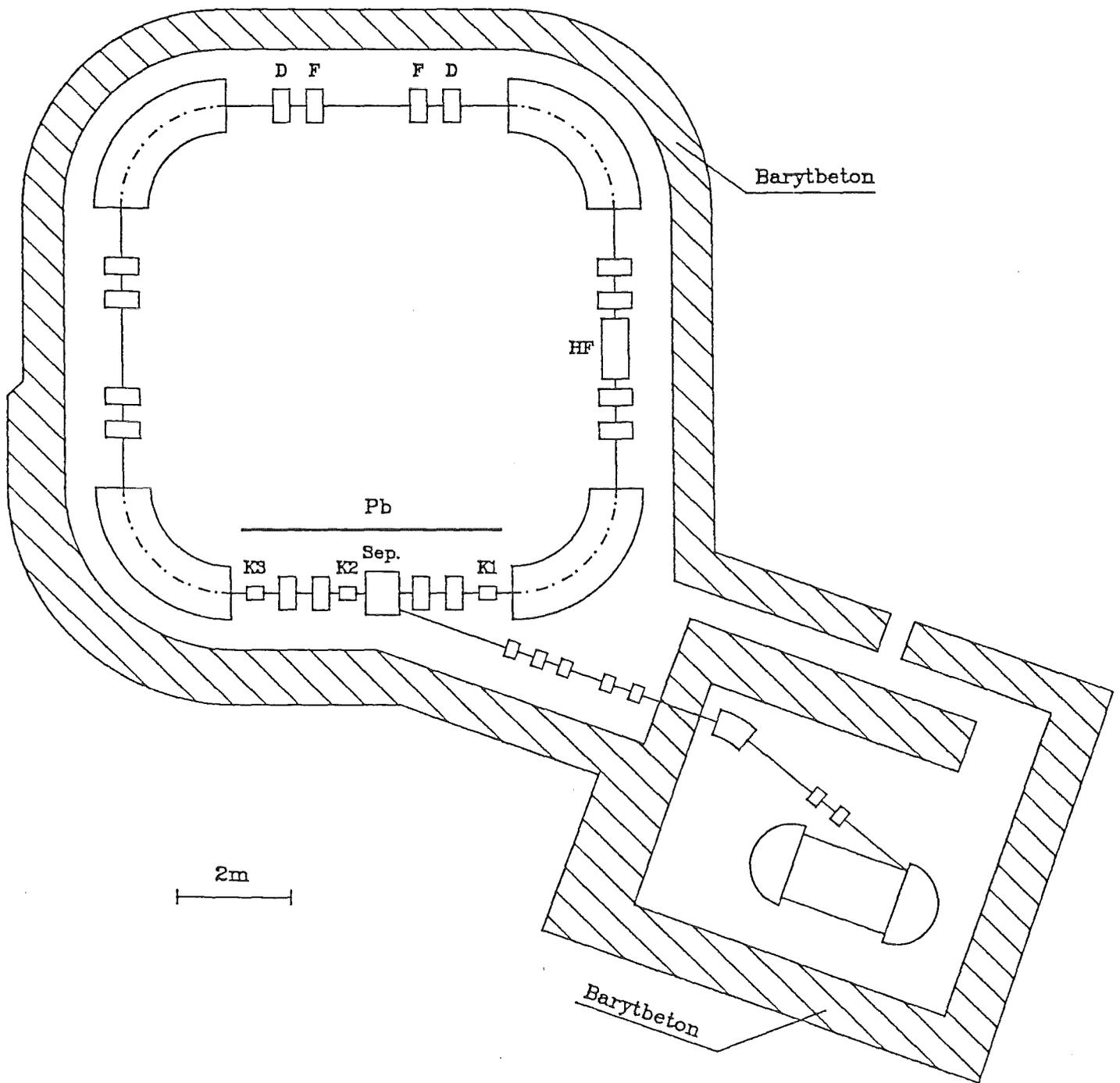


Fig. VIII-1: Speicherringanlage und Racetrack Mirotron mit Abschirmmauer.

als innerbetrieblicher Überwachungsbereich ausgewiesen werden kann. Die Sperrbereiche sind durch ein Personen-Interlocksystem so abgesichert, daß das Öffnen der entsprechenden Absperrungen eine Sicherheitsabschaltung der Strahlenquelle zur Folge hat. Da über die Gegebenheiten außerhalb der Speicherringanlage keine Angaben vorliegen, kann nur darauf hingewiesen werden, daß das Eindringen von Personen in den Sperrbereich unbedingt verhindert werden muß.

Im Anhang A VIII ist eine ausführliche Begründung der Abschirmung zusammen mit Überlegungen für den Betrieb der Anlage im Hinblick auf den Strahlenschutz.

## **2. Kosten**

Die Kosten für die Abschirmmauer, Bleiziegel und Überwachungsgeräte findet man in Anhang A-VIII.

Die Gesamtinvestitionssumme beträgt

561 TDM.

## **IX Positionierungsfragen**

### **1. Übersicht**

Im Anhang A IX wird ein Konzept zur Aufstellung und Justierung des Kompakt-Speicherrings der KSSQ mit geodätischen Meßverfahren vorgestellt.

Ziel der Vermessungsarbeiten ist die geometrisch richtige Positionierung aller Maschinenelemente. Die Aufstellgenauigkeit soll dabei  $\pm 0.2$  mm betragen. Ausgehend von dieser Forderung werden die möglichen Meßverfahren, das notwendige Instrumentarium, das Beobachtungsprogramm und die daraus entstehenden Kosten vorgestellt.

Das Konzept kann zunächst nur einen groben Rahmen für die anstehenden Arbeiten und Kosten bilden. Für die endgültige Realisierung des Projektes ist es unumgänglich, diverse Detailfragen, vor allem in Bezug auf bauliche Maßnahmen, in Projektgesprächen zu klären.

### Zusammenfassung des Justiervorganges

lfd. Nr.	Inhalt
1	Grobmessung der Festpunkte (Lage und Höhe)
2	Grobabsteckung der Supports ( +/-2-3 mm)
3	Aufstellung der Magnete und Vorjustierung der Dipole (+ /-0.5 mm)
4	Höhenmessung
5	Höhen- und Neigungsjustierung der Dipole
6	Lagemessung der Dipole
7	Verschiebung der Dipole in radialer und tangentialer Richtung
8	Überprüfung der Justierung (wie Nr. 6)
9	ggf. Wiederholung der Schritte 7 und 4 bis 6

2. Im Anhang A IX sind die Kosten für die einzelnen Arbeiten und für die notwendigen Investitionen zusammengestellt.

Die Gesamtsumme beträgt

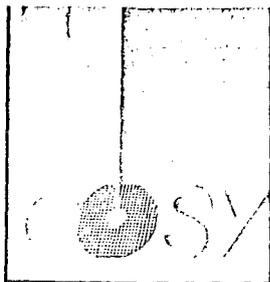
50 TDM.

## X Zusammenstellung der Gesamtinvestitionskosten für die KSSQ

Unter der Voraussetzung, daß die SL-Magnete und ein Injektor industriell gefertigt und alle anderen Komponenten wie in der vorliegenden Studie beschrieben kostengünstig beschafft werden, der gesamte Speicherring aber von KfK-Personal aufgebaut wird, ergeben sich folgende Investitionskosten (für den Injektor wurde der Mittelwert von 6600 TDM der beiden Angebote für Race-track-Mikrotron und Linac eingesetzt):

SL Magnete	4500	TDM
Injektor	6600	TDM
Elektronenstrahlversatz	340	TDM
HF-System	1179	TDM
Vakuumsystem	850	TDM
Restliche Magnete	1476	TDM
Kontrollsystem	782	TDM
Diagnostik	371	TDM
Strahlenschutz	561	TDM
Positionierung	50	TDM
	<hr/>	
	16709	TDM
+ 10 % für Unvorhergesehenes	1671	TDM
	<hr/>	
<b>Gesamtsumme</b>	<b>18380</b>	<b>TDM</b>

Für die betriebsfertige Lieferung des Speicherrings im Auftrag von KfK gibt COSY MicroTec die auf der folgenden Seite beigefügte Kostenzusammenstellung an:



Der in dem gemeinsamen Bericht spezifizierte Speicherring könnte von COSY MicroTec zu einem Gesamtpreis von

DM 32.710.000,00

geliefert werden.

Der Preis ergibt sich wie folgt:

	in TDM
Speicherringkomponenten	24508
Personalkosten	6832
Montage, Verdrahtung	985
Inbetriebnahme	385
SUMME	32710

Hanau, den 12.11.1988

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Reißberg', with a stylized flourish at the end.

## Literatur

- 1) D. Einfeld, et al.  
Entwurf einer Synchrotronstrahlungsquelle mit supraleitenden Ablenk-  
magneten für die Mikrofertigung nach dem LIGA-Verfahren.  
KfK-3976 (1985)
- 2) B. Krevet, H.O. Moser, C. Dustmann, "Design Study of a Strongly Curved  
Superconducting Bending Magnet for a Compact Synchrotron Light  
Source", Advances in Cryogenic Engineering Vol. 33, S. 25-32, 1988.
- 3) Herbert O. Moser, Berthold Krevet und Alex J. Dragt, "Nonlinear Beam  
Optics with real Fields in Compact Storage Rings", Proc. of the IEEE Particle  
Accelerator Conference, Washington D.C., March 16-19, 1987, S. 458 - 460.