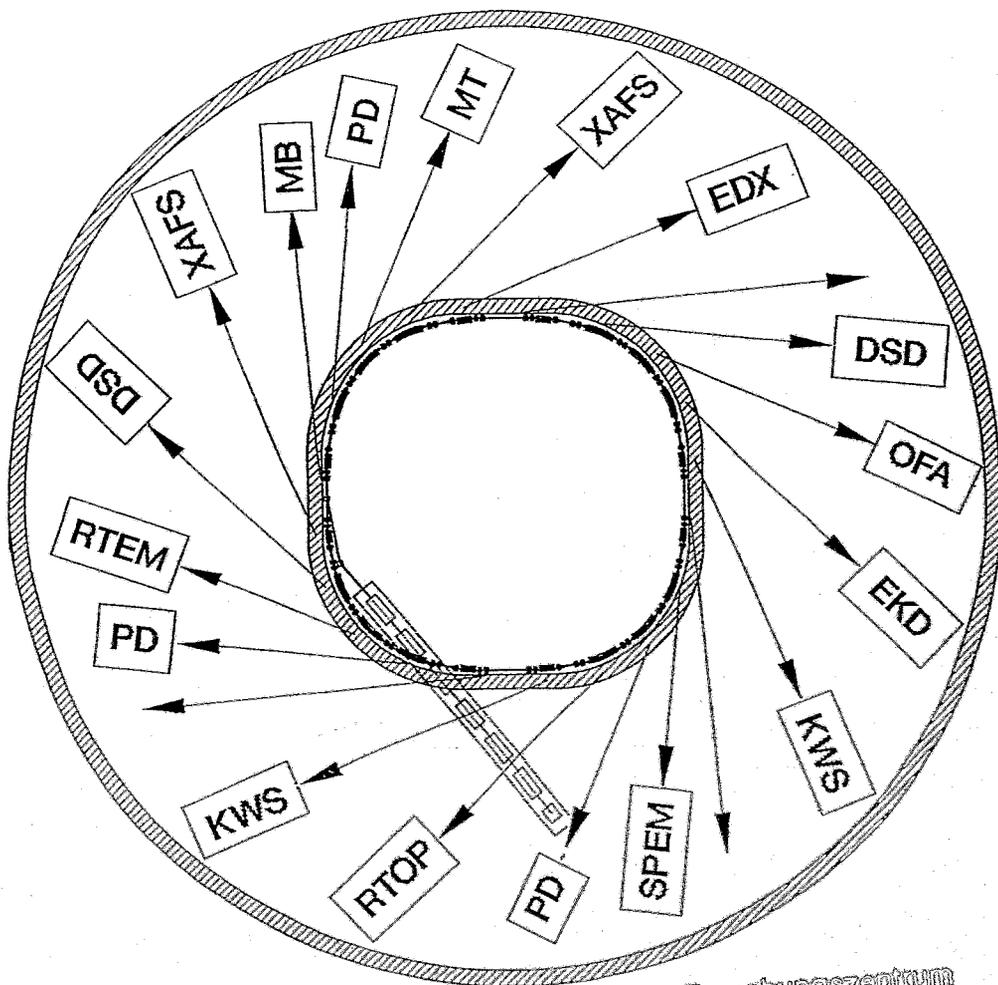


FZR 92 - 10
Juni 1992

Archiv-Ex.:

ROSY

Rosendorfer Synchrotronstrahlungsquelle



Forschungszentrum
Rosendorf e.V.
- Zentralbibliothek -
Postfach 19 03/93
© - 8051 Dresden

ROSY - Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle

**Vorschlag für die Errichtung einer
Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung
im Forschungszentrum Rossendorf**

Dieser Projektvorschlag wurde im Forschungszentrum Rossendorf (FZR) unter Mitwirkung folgender Institutionen erarbeitet:

Technische Universität Dresden (TUD), Fachabteilung Physik
Institut für Festkörper- und Werkstofforschung Dresden (IFW)
Bergakademie Freiberg (BAF), Fachbereich Werkstoffwissenschaft
Technische Universität Chemnitz (TUC)
Institut für Polymerforschung Dresden (IPF)
Fachhochschule Ostfriesland (FHO), Fachbereich Naturw. Technik

verantwortliche Bearbeiter: W. Matz (Teil I)
D. Einfeld (Teil II)

Inhaltsübersicht

Zusammenfassung

Teil I: Wissenschaftliche Begründung

1. Zielstellung
 - 1.1. Materialforschung in Sachsen
 - 1.2. Optionen für die Nutzung eines Synchrotronstrahlungslabors durch osteuropäische Länder
 - 1.3. Arbeitsgebiete für Untersuchung mit Synchrotronstrahlung
 - 1.4. Anforderungen der Materialforschung an eine Synchrotronstrahlungsquelle
 - 1.5. Potentielle Nutzung der Synchrotronstrahlungsquelle außerhalb der Materialforschung
 - 1.6. Einbettung in ein Strahlencentrum Rossendorf
2. Das Konzept für ROSY und seine Einordnung
 - 2.1. Wesentliche Parameter von ROSY I
 - 2.2. Das Magnetsystem des Speicherringes
 - 2.3. Die Ausbauvariante ROSY II
 - 2.4. Einordnung des Projektes
3. Der Standort Rossendorf
 - 3.1. Wissenschaftlich-technische Voraussetzungen für ROSY im Forschungszentrum Rossendorf
 - 3.2. Technische Voraussetzungen
 - 3.3. Platz für die Synchrotronstrahlungsquelle
4. Einfluß auf die Region
 - 4.1. Kooperation mit wissenschaftlichen Einrichtungen
 - 4.2. Einfluß auf die regionale Industrie

Literatur I

- Anhänge: A) Forschungseinrichtungen der Materialforschung in Sachsen
B) Zusammenstellung von Synchrotronstrahlungsquellen
C) Technische Standortbeschreibung für Rossendorf

1. Allgemeines
2. Magnetstruktur für den Speicherring ROSY I
 - 2.1 Einführung
 - 2.2 Aufbau und Eigenschaften der Einheitszelle
3. Achromat des Speicherringes ROSY I
4. Speicherringkomponenten für ROSY I
 - 4.1 Ablenkmagnete
 - 4.2 Quadrupole
 - 4.3 Sextupole
 - 4.4 Netzgeräte
 - 4.5 Hochfrequenzsystem
 - 4.6 Kontroll- und Informationssystem
5. Injektor
6. Speicherring ROSY II
 - 6.1 Einführung
 - 6.2 Magnetstruktur für ROSY II
 - 6.3 Achromat des Speicherringes ROSY II
 - 6.4 Speicherringkomponenten für ROSY II
 - 6.4.1 Ablenkmagnete
 - 6.4.2 Quadrupole
 - 6.4.3 Sextupole
 - 6.4.4 Hochfrequenzsystem für ROSY I
7. Undulatoren und Wiggler
 - 7.1 Undulatoren und Wiggler für ROSY II
 - 7.2 Undulatoren und Wiggler für ROSY I
8. Synchrotronstrahlungscharakteristiken
 - 8.1 Eigenschaften der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I
 - 8.2 Vergleich verschiedener Synchrotronstrahlungsquellen
 - 8.3 Brillanz der Synchrotronstrahlung in Ablenkmagneten
9. Anhang
 - 9.1 Beugungsbegrenzte Strahlungsquellen
 - 9.2 A Modified QBA-Optics for Low Emittance Storage Rings
10. Literatur II

Zusammenfassung

Das Forschungszentrum Rossendorf schlägt den Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle vor, die für die Materialforschung dediziert ist. Diese Synchrotronstrahlungsquelle ist ein Hauptelement des Strahlencentrums Rossendorf, dessen anderer wesentlicher Teil die Ionenstrahlentechnik für die Materialforschung ist.

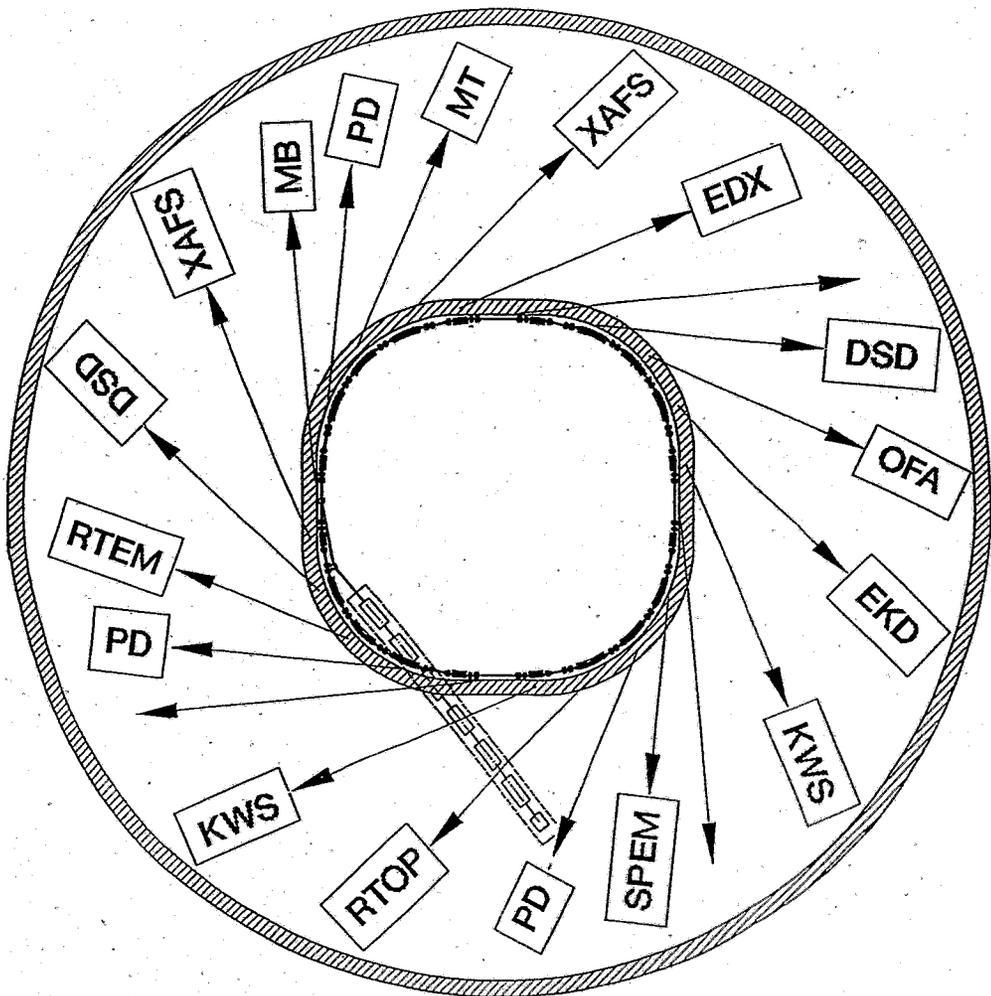
Synchrotronstrahlung ist wegen ihrer hohen Intensität und ihrer sehr guten Parallelität ein universelles Analysetool zur Aufklärung von Struktur, Zusammensetzung, Homogenitätsabweichungen und anderen Charakteristika kondensierter Phasen. Die in der Grundlagenforschung mit Hilfe der Synchrotronstrahlung entwickelten Analysetechniken lassen sich mit großem Gewinn an Aussagekraft in der anwendungsorientierten und angewandten Forschung nutzen.

Die Auslegung der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY orientiert sich an den Forderungen der strukturbezogenen Materialforschung, die sich im Raum Dresden und Sachsen konzentriert und an Universitäten, Instituten der Blauen Liste, Fraunhofer-Einrichtungen und anderen Forschungsstellen betrieben wird. Darüber hinaus wird die Nutzung durch Gruppen außerhalb der Region, insbesondere aus den osteuropäischen Nachbarländern erwartet. Eine Nutzung über die Materialforschung hinaus, etwa für die Kernphysik oder die Biomedizin, ist möglich.

Das technische Konzept beinhaltet den Aufbau eines mittelgroßen Speicherringes ROSY I von 120 m Umfang. Mit einer nominellen Elektronenenergie von 3 GeV liegt die kritische Wellenlänge des emittierten Röntgenspektrums bei 0,15 nm. Die Quelle wird eine Emittanz von 40 μnmrad haben und dadurch sowohl für die Materialforschung als auch für angewandte und industrielle Arbeiten (z.B. Mikrosystemtechnik) gute Arbeitsbedingungen bieten. Insbesondere ist eine enge Kopplung an die Ionenstrahlphysik im FZR bis hin zu in-situ Experimenten vorgesehen. Mit der Detailplanung und nachfolgend dem Bau von ROSY I könnte unmittelbar begonnen werden, da die Konstruktion in wesentlichen Teilen auf technologische Lösungen zurückgreift, die an anderen Synchrotronstrahlungslabors im In- und Ausland bereits realisiert werden.

Längerfristig ist ein Ausbau zu einer Hochleistungsquelle ROSY II mit niedriger Emittanz (3 μnmrad) ins Auge gefaßt, die dann auch in stärkerem Maße für die Grundlagenforschung neue Möglichkeiten eröffnet.

Das Gesamtkonzept ist gegenwärtig stärker an regionalen Erfordernissen orientiert, aber für Modifizierungen, die es einem erweiterten Nutzerkreis attraktiv machen, offen.



Teil I: Wissenschaftliche Begründung

- Juni 1992 -

1. Zielstellung

1.1. Materialforschung in Sachsen

Im sächsischen Raum konzentriert sich die physikalisch orientierte Materialforschung in Ostdeutschland und kann hier auf langjährige Traditionen verweisen. Man findet eine besonders hohe Konzentration dieser Forschungsrichtung. Im Raum Dresden liegt die Technische Universität Dresden, das Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung, das Forschungszentrum Rossendorf und das Institut für Polymerforschung als Institute der "Blauen Liste" sowie 5 ebenfalls auf dem Gebiet der Materialforschung tätige Institute der Fraunhofer-Gesellschaft. Darüber hinaus haben auch die Technische Universität Chemnitz und die Bergakademie Freiberg beachtliche Potentiale auf die Materialforschung ausgerichtet. Eine Liste der Einrichtungen ist in Tabelle 1.1 zu finden. Eine etwas ausführlichere Darstellung des vorgesehenen Forschungsprogramms der verschiedenen Institutionen enthält Anhang A.

Allein in den Dresdner Instituten sind etwa 1400 Mitarbeiter tätig, von denen sich etwa 800 der Materialforschung zuordnen lassen. An den aufgeführten Universitäten sind in dem Gebiet der Materialforschung und den damit verbundenen Grundlagendisziplinen Physik und Chemie in Zukunft etwa 30 - 40 Lehrstühle zu erwarten. Das Materialspektrum wird in allen genannten Institutionen, mit einer Ausnahme, durch metallische und nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe in festem Zustand geprägt. Themengebiete der Forschung dieser Einrichtungen sind:

- Festkörper- und Tieftemperaturphysik (insbesondere Supraleitung, Magnetismus, ferroelektrische und ferroelastische Phasen)
 - Physik dünner Schichten und ihrer Herstellungsverfahren, einschließlich Hartstoffschichten
 - Materialmodifizierung durch Oberflächenbeeinflussung mit Strahlung (Ionen, Laser, Elektronen)
 - Untersuchung des Zusammenhangs zwischen strukturellen und mechanischen Eigenschaften, insbesondere bei metallischen Werkstoffen und Verbundwerkstoffen
 - Entwicklung und Optimierung keramischer Werkstoffe
 - Untersuchung geologischer und polymerer Stoffe
 - Strukturaufklärung an kristallinen und nichtkristallinen Phasen
- Den meisten dieser Arbeitsgebiete ist gemein, daß sie auf die Entwicklung neuartiger Werkstoffe mit innovativen Anwendungsmöglichkeiten zielen. Dabei wird vorzugsweise der Gesamtprozeß von den naturwissenschaftlichen Grundlagen der Wirkprinzipien über Syntheseverfahren bis hin zur Charakterisierung bearbeitet.

Tab. 1.1: Übersicht über Forschungseinrichtungen in Sachsen, die Materialforschung betreiben.

<p>1. Hochschulen</p>
<p>1) Technische Universität Dresden 2) Technische Universität Chemnitz 3) Bergakademie Freiberg 4) Universität Leipzig</p>
<p>2. Institute der "Blauen Liste"</p>
<p>1) Forschungszentrum Rossendorf (450 Mitarbeiter) 2) Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (285 Mitarbeiter) 3) Institut für Polymerforschung Dresden (170 Mitarbeiter) 4) Institut für Oberflächenmodifizierung Leipzig (60 Mitarbeiter)</p>
<p>3. Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft für</p>
<p>1) Elektronenstrahl- und Plasmatechnik Dresden (75 Mitarbeiter) 2) Werkstoffphysik und Schichttechnologie Dresden (55 Mitarbeiter) 3) Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe Dresden (75 Mitarbeiter) 4) Umformtechnik und Werkzeugmaschinen Chemnitz (95 Mitarbeiter) 5) Mikroelektronische Schaltungen und Systeme Dresden (130 Mitarbeiter) 6) Automatisierung des Schaltkreis- und Systementwurfs Dresden (30 Mitarbeiter) 7) Pulvermetallurgie und Verbundwerkstoffe Dresden (20 Mitarbeiter) 8) Akustische Diagnostik und Qualitätssicherung Dresden/ Rossendorf (30 Mitarbeiter)</p>

Moderne Werkstoffforschung erfordert umfassende Kenntnisse über den strukturellen und elektronischen Aufbau der Materialien und über die Zusammenhänge zwischen Darstellung und den physikalischen Eigenschaften. Dabei werden die interessierenden Werkstoffe in ihrem strukturellen Aufbau immer komplizierter. So sind z. B. heterogene Systeme mit komplizierten Kristallstrukturen, amorphe und flüssige Phasen, Monolagen, dünne Schichten und Schichtsysteme Gegenstand aktueller Grundlagenforschungen zur Materialentwicklung.

Die Entwicklung der Werkstoffforschung hat gezeigt, daß die Anwendung von Strahlen (Licht, Gamma, Elektronen, Neutronen, Ionen) für die Modifizierung von Materialien und zur Analytik unverzichtbar sind. Diese Feststellung gilt insbesondere für die Dünnschichttechnologien, die einen immer breiteren Raum in der Materialforschung einnehmen, da die Beeinflussung von Oberflächeneigenschaften oder die Erzeugung spezieller Oberflächenstrukturen sehr effektive Möglichkeiten zur Entwicklung neuer oder verbesserter Werkstoffe bieten.

Eine vorteilhafte Besonderheit der Materialforschung in Dresden liegt darin, daß hier bereits viele der für eine strahlungsgestützte Materialforschung (Modifizierung und Analyse) wesentlichen Methoden existieren und bezüglich ihrer Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten erfolgreich bearbeitet werden. Das betrifft Laserstrahlung (FhG-Institut für Werkstoffphysik und Oberflächenveredlung), Elektronenstrahlung (FhG-Einrichtung für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik, Institut für Technologie der Polymere), Ionen- und Neutronenstrahlung (Forschungszentrum Rossendorf).

Auf den bisherigen Entwicklungen aufbauend ist es notwendig, die Materialforschung als eine profilbestimmende Säule der Forschungslandschaft in Sachsen weiter auszubauen. Eine solche Vorgehensweise wird auch vom BMFT unterstützt [1]. Für den angestrebten Werkstoffforschungsverbund Dresden kann das integrierende Thema "Material- und Verfahrensentwicklung, Werkstoffdiagnostik und Qualitätssicherung mit Hilfe von Strahlentechniken" sein. In diesem Kontext beabsichtigt das Forschungszentrum Rossendorf eine moderne Synchrotronstrahlungsquelle zu errichten, die mit ihrer Emittanz an der oberen Grenze von Quellen der 3. Generation * liegt. Diese soll sowohl für den Großraum Dresden-Chemnitz-Freiberg als auch überregional ein attraktives

* In die Gruppe der 3. Generation rechnet man solche Synchrotronstrahlungsquellen, die für die Erzeugung solcher Strahlung dediziert sind, Emittanzen von $\leq 40 \text{ nmrad}$ erreichen und gerade Abschnitte für den Einbau von Strahlformierungseinrichtungen (Wiggler/Undulatoren) aufweisen. Vgl. auch Anhang B.

Forschungsgerät sein. In der bisherigen Darstellung steht das Forschungsprofil der unmittelbaren Umgebung von Rossendorf im Vordergrund. Im Zuge der Präzisierung der Vorstellungen ist vorgesehen, auch den Bedarf anderer Forschungsstandorte in Deutschland und speziell in den neuen Bundesländern an einer Synchrotronstrahlungsquelle mit den unten beschriebenen Charakteristika zu analysieren. Bei der überregionalen Nutzung geht es aber besonders auch um die Ausstrahlung zu den unmittelbaren Nachbarstaaten Polen und CSFR und darüber hinaus nach Osteuropa.

Die Synchrotronstrahlung (SR) kann wegen der einzigartigen Eigenschaften in der Werkstoffanalytik und in der Materialentwicklung wesentliche Beiträge liefern. Die potentiellen Möglichkeiten der Anwendung von Synchrotronstrahlung in der Werkstoffforschung, aber auch in anderen Gebieten, wie in der biologischen und medizinischen Forschung und in der Mikrostrukturtechnik finden ihren Ausdruck in der weltweiten Entwicklung neuer Synchrotronstrahlungsquellen. Die moderne Werkstoffforschung bedarf dieses Instruments, das völlig neue Untersuchungsmethoden erschließt, aber auch bei konventionellen Techniken Genauigkeit und Informationsgehalt verbessert.

Für die Dresdner Werkstoffforschung ist, um international konkurrenzfähig zu sein, die Verfügbarkeit von Spitzengeräten in den Instituten unbedingt erforderlich. Neben den Ausrüstungen, die in Einzellabors stehen oder in einzelnen Instituten überwiegend selbst genutzt werden, ist auch der Einsatz von Großgeräten unumgänglich. Ein wesentliches Erfordernis für eine moderne Werkstoffforschung in Sachsen ist der leichte Zugang und ein hohes Strahlzeitangebot von Synchrotronstrahlungsquellen. Eine entsprechende Synchrotronstrahlungsquelle, die sich vorwiegend an den spezifischen Aufgaben der Werkstoffforschung orientiert, befände sich im Dresdner Raum in einem guten Forschungsumfeld.

1.2. Optionen für die Nutzung eines Synchrotronstrahlungs- labors durch osteuropäische Länder

In stärkerem Maße als in Sachsen ist für die beiden Nachbarländer Polen und CSFR die Entwicklung der Materialwissenschaften und moderner Technologien als Basis für eine konkurrenzfähige Industrie notwendig. Andererseits sind gerade in den angrenzenden Regionen Schlesien und Böhmen bereits eine Reihe von bedeutenden Forschungseinrichtungen vorhanden, die im Bereich der Materialwissenschaften und ihrer naturwissenschaftlichen Grundlagendiszi-

plinen tätig sind.
 In Polen gibt es eine Reihe von Forschungseinrichtungen an denen Aufgaben bearbeitet werden, zu deren Lösung der Einsatz von Synchrotronstrahlung nötig ist. Tabelle 1.2 enthält eine Übersicht [2], die aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Zur Vertretung der Interessen wurde kürzlich eine polnische Gesellschaft für Synchrotronstrahlung gegründet [3].

Tabelle 1.2: Forschungseinrichtungen in Polen, an denen Synchrotronstrahlungsgruppen tätig sind

1. Zentren
1) Jagellonen-Universität Krakow (Institut für Physik, Institut für Chemie, Zentral-labor für physikalische, chemische und strukturelle Analysen) 2) Bergakademie Krakow 3) Institut für Kernphysik, Krakow 4) Institut für Metallurgie PAN, Krakow 5) Universität Warschau (Institut für Physik, Fakultät für Chemie) 6) Technische Universität Warschau (Institut für Physik) 7) Institut für Physik PAN, Warschau 8) Institut für Physikalische Chemie PAN, Warschau 9) Institut für Kernchemie und -technik, Warschau
2. Schlesien
1) Universität Wroclaw (Institut für Experimentalphysik, Institut für Chemie) 2) Institut für Tieftemperaturphysik und Struktur-forschung PAN, Wroclaw 3) Schlesische Universität Katowice (Institut für Physik und Chemie der Metalle) 4) Institut für Eisenmetallurgie, Gliwice
3. andere Regionen
1) Adam Mickiewicz Universität, Poznan. (Institut für Physik) 2) Universität Lodz (Institut für Chemie) 3) Institut für Atomenergie, Swierk

Als Arbeitsbereiche polnischer Gruppen, die Synchrotronstrahlungsexperimente an ausländischen Quellen durchführen sind zu nennen: 1) Diffraktionsuntersuchungen an Einkristallen (speziell Mikrokristalle) und Polykristallen, im zeitauflösenden Regime zur Verfolgung von Phasenübergängen oder der Reaktionskinetik, an Oberflächen; 2) Röntgenabsorptionsuntersuchungen zur Aufklärung der elektronischen Struktur von Metallen, Halbleitern, organischen Verbindungen und zum Studium der lokalen Struktur von Festkörpern (Mischverbindungen, Nichtstöchiometrie); 3) VUV-Spektroskopie und Photoemissionsstudien an Metallen und Halbleiterverbindungen; 4) biologische und angewandte medizinische Studien mit EXAFS und XANES (Spektroskopie an Röntgenabsorptionskanten).

Im benachbarten Böhmen sind vor allem in Prag mit der Karls-Universität und dem Institut für Physik der Akademie und in Plzen mit der Skoda-Forschungszentrum große Einrichtungen, die in beachtlichem Maße materialorientiert forschen. Darüberhinaus sind einschlägige Forschungseinrichtungen in Brno, Bratislava, Olomouc und Kosice zu finden. Hauptarbeitsgebiete sind Strukturuntersuchungen mit Röntgendiffraktion, aber auch spektroskopische Techniken werden gepflegt. Gegenwärtig gibt es etwa 30 Wissenschaftler, die bereits an ausländischen Synchrotronstrahlungsquellen gearbeitet haben [4]. Diese Zahl ist insofern nicht repräsentativ für den Bedarf, als man Reise- und Finanzprobleme berücksichtigen muß. Als Materialgruppen stehen Halbleiter, Metalle und Legierungen, Hochtemperatursupraleiter, Komplexverbindungen, Polymere, biologische und geologische Substanzen auf dem Programm, wobei die Palette der untersuchten Effekte praktisch alle Gebiete, die sich mit Synchrotronstrahlung bearbeiten lassen, berührt. Eine detailliertere Darstellung der Aufgabenfelder für Synchrotronstrahlungsexperimente polnischer und tschechischer Gruppen wird im Zuge der weiteren Bearbeitung des Projektvorschlages gemeinsam mit Kollegen in diesen Ländern erarbeitet.

Ein Bedarf für den unmittelbaren Zugang zu einer Synchrotronstrahlungsquelle ist in beiden Ländern vorhanden, den es gab in der Vergangenheit mehrfach Bemühungen der interessierten Wissenschaftlergruppen, die Errichtung einer nationalen Quelle bzw. auch eines Dreierprojektes Polen-CSFR-DDR in Gang zu bringen. Momentan sind eine Reihe von Gruppen oder Einzelwissenschaftler an Synchrotronstrahlungsquellen im Ausland aktiv.

Es ist daher im Sinne der verstärkten Integration der angestrebten Euroregion Sachsen-Böhmen-Schlesien, beim Neuaufbau der Forschung in Sachsen so leistungsfähige Zentren zu schaffen, daß

sie Arbeitsmöglichkeiten für Gastwissenschaftler aus den Nachbarländern und natürlich auch anderen Ländern, insbesondere Osteuropas, bieten. Dabei wäre für die osteuropäischen Länder und insbesondere für Polen und die CSFR (wegen der räumlichen Nähe) in erster Linie der Zugriff zu moderner Forschungstechnik attraktiv, während für die Forschung in Sachsen das Einbringen neuer Ideen und eine Verstärkung der personellen Basis von Interesse sind.

1.3. Arbeitsgebiete für Untersuchungen mit Synchrotronstrahlung

Stark verallgemeinert lassen sich materialforschungsorientierte Untersuchungen mit Synchrotronstrahlung in strukturbezogene und spektroskopische Techniken einteilen. Hinzu kommen angewandte und technologische Forschungsaufgaben, wie z. B. die Lithografie oder die Mikrostrukturtechnik.

Durch Auswertung von Beugungserscheinungen und Interferenzeffekten erhält man Aussagen über die atomare Struktur von Festkörpern oder auch Flüssigkeiten bzw. im Bereich kleiner Streuwinkel über Form und Gestalt von makroskopischen Strukturen, die Inhomogenitäten in der Streukraft bewirken.

Die Spektroskopie von Sekundärstrahlung (Photoelektronen, Röntgenfluoreszenzstrahlung), die durch die Synchrotronstrahlung angeregt wird, liefert Informationen über die elektronische Struktur, wie z.B. über Bindungsverhältnisse, bzw. dient zum Nachweis der chemischen Zusammensetzung. Hauptanwendungsgebiete finden sich deshalb vor allem in der physikalischen Chemie. Fragen zur Elektronenstruktur (z.B. Bandstruktur von Metallen oder Halbleitern) sowie elementspezifische Aussagen zur Struktur sind jedoch auch für die Materialforschung von großer Bedeutung.

Einige wesentliche Anwendungen, die die Synchrotronstrahlung für die moderne Materialforschung besonders attraktiv machen, sind folgende:

Gegenüber der Strukturaufklärung durch klassische **Röntgendiffraktion** ermöglichen die Vorzüge der Synchrotronstrahlung vor allem die Arbeit mit sehr kleinen Probenmengen aber auch Präzisionsgitterkonstantenbestimmungen wie etwa zum Nachweis innerer Spannungen oder von Gitterverzerrungen in Schichtstrukturen. Durch die geringe Divergenz der Strahlung sind Untersuchungen, z.B. der Textur, mit hoher örtlicher Auflösung möglich. So kann unter anderem der Zusammenhang zwischen Kornorientierung und Spannungen studiert werden. Die geringe Strahldivergenz bei sehr hoher Intensität (hohe Brillanz) erlauben de facto die Untersuchung von einkristallinen Bereichen im Polykristall. Es wird auch der Nach-

weis leichter Elemente oder die Unterscheidung von Elementen wenig unterschiedlicher Ordnungszahl im Kristallgitter möglich (bisher der Neutronendiffraktion vorbehalten). Die Ausnutzung der wellenlängenabhängigen Streukraftänderung (anomale Dispersion) ist neben letzterem auch für die Ermittlung elementspezifischer Paarkorrelationsfunktionen in amorphen Systemen von herausragender Bedeutung.

Die hohe Intensität und die Impulsstruktur der Synchrotronstrahlung gestatten **in-situ Untersuchungen von Prozeßabläufen**. So kann die zeitabhängige Registrierung der Kleinwinkelstreuung von Inhomogenitäten (Dichteschwankungen, Elementverteilung) zum Studium von Diffusionsprozessen sowie Lösungs- und Entmischungsvorgängen genutzt werden. Die in-situ-Beobachtung von Materialmodifikationen, z. B. durch Teilchenstrahlen, eröffnet für diesen Forschungszweig völlig neue Möglichkeiten. Auch hier spielt die Möglichkeit wegen der hohen verfügbaren Primärstrahlintensität mit sehr kleinen Probenmengen zu arbeiten, eine wesentliche Rolle.

Besondere Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren besitzt die Synchrotronstrahlung bei der Untersuchung von **Oberflächen, Grenzflächen und dünnen Schichten**. Die extreme niedrige natürliche Divergenz der Strahlung gestattet Messungen mit stark streifenden Einfall bzw. in Totalreflexion und damit eine hohe Oberflächenselektivität.

Im Kleinwinkelstreubereich führen Interferenzen in Schichtstrukturen zu Aussagen über die Schichtdicke, die Rauigkeit bzw. Dickeninhomogenität und die Dimension von Übergangsbereichen.

Die sehr schwachen Intensitäten der regulären Reflexion an Oberflächen oder Grenzflächen werden sicher meßbar (Oberflächendiffraktion). Man erhält daraus z.B. Informationen über die Oberflächenrekonstruktion oder Adsorbatschichten.

Spektroskopische Verfahren wie die **Röntgenfluoreszenzanalyse** können durch Messung im Bereich der Totalreflexion oder durch die Nutzung stehender Wellen, die sich bei der Reflexion an inneren Grenzflächen oder an der Grenzfläche zu einem geeigneten Substrat bilden, tiefenselektiv gestaltet werden. So sind z.B. Aussagen über Grenzflächen epitaktischer Schichten möglich. Mehrfachschichten (z.B. Superlattices) eignen sich für solche Experimente besonders gut.

Weite Verbreitung hat bereits das **EXAFS-Verfahren**, d.h. die Untersuchung von Interferenzeffekten in der Röntgenabsorption zur Bestimmung der Umgebungsstruktur des absorbierenden Atoms, gefun-

den. Werden zum Nachweis des Effektes die emittierten Fotoelektronen oder bei inneren Grenzflächen die Röntgenfluoreszenzstrahlung genutzt, so wird damit eine hohe Oberflächenselektivität erreicht.

Die Möglichkeit mit sehr feinfokussierten Strahlen zu arbeiten gestattet den Aufbau einer Röntgenmikroskopie, Arbeiten zur Mikrotopographie (Nachweis von Strukturfehlern in nahezu perfekten Kristallen mit mikroskopischer Auflösung) sowie tomografische Untersuchungen.

Aus der Sicht potentieller regionaler Nutzer einer Synchrotronstrahlungsquelle sollte diese im Röntgenbereich emittieren und folgendes Spektrum von Experimenten erlauben:

(Abkürzungen: TUD, TUC - Technische Universität Dresden, Chemnitz; BAF - Bergakademie Freiberg; IFW - Institut für Festkörper- und Werkstofforschung; IPF - Institut für Polymerforschung; FhG - Institute der Fraunhofer-Gesellschaft)

* Röntgendiffraktometrie

- Phasenanalyse insbesondere auch an mehrphasigen Materialien mit linienreichen Beugungsbildern - Metalle, Halbleiter, Keramiken, Hochtemperatursupraleiter, Polymersysteme, geologische Materialien (alle Institute)
 - Strukturverfeinerungen und Hochauflösungsexperimente an kristallinen Werkstoffen (TUD, TUC, BAF, IFW, FZR)
 - Strukturuntersuchungen an Oberflächen, Grenzflächen und dünnen Schichten, auch mit hoher Auflösung (TUD, TUC, FZR, FhG)
 - Strukturuntersuchungen an amorphen Stoffen, Schmelzen und Polymeren (TUC, IFW, FZR, IPF)
 - zeitaufgelöste Untersuchungen zur Kinetik oder Dynamik von Phasenbildung und Phasenumwandlungen, von Fällungsreaktionen mit der Möglichkeit des Studiums der Effekte in äußeren Feldern (FZR, TUD, IFW, TUC, BAF, IPF)
 - lokale Strukturanalyse im Bereich von 1 μm (IFW, TUD, TUC)
 - hochaufgelöste Profilanalyse (IFW, FhG, TUC)
- * Nutzung der anomalen Röntgenbeugung zur Ermittlung von Strukturdetails durch elementspezifische Beugungsdaten (TUD, IFW, BAF, TUC)
- * Kleinwinkelstreuung für die Untersuchung von Inhomogenitäten in festen Phasen, der Bildung und Umwandlung von Defektstrukturen (Strahlungsdefekte) und von Ordnungen mittlerer Reichweite in Schmelzen, Lösungen, Polymeren, auch unter Einbeziehung der anomalen Dispersion (TUC, TUD, FZR, FhG, IFW, IPF)
- * Röntgenmikrotomographie an mehrphasigen Werkstoffen und Kompositen (Faser- und Schichtverbunde) einschließlich Textur- und Gefügeanalyse (TUC, BAF, TUD, FhG-FZR)

- * Röntgentopografie an Halbleitern (BAF, FZR)
- * Röntgenfluoreszenzanalyse hoher lateraler Auflösung zur chemischen Charakterisierung von Einschlüssen (BAF, FZR, TUD)
- * spektroskopische Verfahren mit hoher Tiefenauflösung zur Charakterisierung von Oberflächen und Grenzflächen (TUD, TUC, FZR, IFW)
- * EXAFS zur elementspezifischen Untersuchung der Nahordnung in Metallen, Keramiken sowie amorphen oder nanokristallinen Schichten (IFW, TUC, TUD, FZR, BAF, FhG)
- * Röntgenmikroskopie an keramischen Werkstoffen und Bauteilen (IFW, FhG, BAF)

Obwohl in der Vergangenheit für Synchrotronstrahlungsexperimente nur die etwa 4500 km entfernte Quelle in Novosibirsk zugänglich war, gibt es Wissenschaftler mit eigener Experimentierpraxis an Synchrotronstrahlungsquellen im Dresdner Raum (TUD, BAF, IFW). Erst in jüngster Zeit war es möglich, auch Experimente an den nationalen Quellen bei BESSY und DESY durchzuführen.

Diese Darstellung berücksichtigt im Moment nur die potentiellen regionalen Anwender. Im nächsten Schritt werden auch Forschungseinrichtungen darüberhinaus einbezogen werden.

1.4. Anforderungen der Materialforschung an eine Synchrotronstrahlungsquelle

Es ist ersichtlich, daß der Schwerpunkt der Aufgaben auf den Beugungsexperimenten liegt. Zur Quantifizierung der daraus ableitbaren Forderungen bezüglich des Energiebereiches an eine problemangepaßte Synchrotronstrahlungsquelle wurde die relative Bedeutung der im vorigen Abschnitt erwähnten Methoden in bestimmten Energiebereichen bewertet (Tabelle 1.3). Diese Bewertung ist nicht völlig frei von subjektiven Einschätzungen, liefert jedoch einen annähernden Vergleich zwischen den Energiebereichen von Synchrotronstrahlung.

Für eine Reihe der im Abschnitt 1.3. genannten Experimente ist eine hohe Lebensdauer des Strahles notwendig, um effektiv zu arbeiten. Das sind solche Experimente, die hohe Justiergenauigkeiten erfordern. Dazu zählen Hochauflösungsdiffraktometrie, Differenzanalysen bei Streuexperimenten unter Nutzung der anomalen Dispersion, Oberflächendiffraktometrie oder die Röntgenmikrotomographie die Beobachtung von Strukturänderungen infolge äußerer Belastung (z.B. Rißwachstum).

Tabelle 1.3: Synchrotronstrahlungsmethoden für die Materialforschung in Relation zu Energiebereichen

(Die Kreuze sind ein Maß für die relative Wichtigkeit der Methoden in unterschiedlichen Energiebereichen. Die Anzahl der Kreuze enthält gleichzeitig eine subjektive Wichtung der Häufigkeit des Einsatzes der jeweiligen Methode.)

Methode	<2 keV	2...20 keV	>20 keV
1. Absorption (XANES, EXAFS)	+ + +	+ + +	+
2. Reflexion	+ + +		
3. Fluoreszenz-Spurenanalyse	+ +	+ + +	+
4. Photoemission	+ + +	+	
5. Mikroskopie	+ + +	+ +	
6. Topographie		+	
7. Pulverdiffraktion		+ + +	+
8. Diffraktion an nichtkristallinen Festkörpern und an Schmelzen		+ + +	+
9. Hochaufgelöste Diffraktion		+ +	+ +
10. energiedispersive Diffraktion		+ +	+
11. Einkristall-Diffraktometrie		+ + +	+ + +
12. Dünnschichtdiffraktometrie		+ +	+
13. Kleinwinkelstreuung		+ + +	+
14. Mößbauer-Spektroskopie		+ + +	+ + +
15. Compton-Streuung		+	+ +
16. Röntgenmikrotomographie		+ + +	+ + +
17. Mikrostrukturtechnik		+ +	

Aus den Darstellungen im vorigen und in diesem Abschnitt, lassen sich als Forderungen an ROSY angeben:

- Synchrotronstrahlungsquelle mit kritischer Wellenlänge im Röntgengebiet um 0,1-0,2 nm (kritische Photonenenergien im Bereich 6-12 keV)
 - Quelle mit einer Emittanz $\leq 50 \text{ } \mu\text{nmrad}$
 - Konstruktion und Strahlrohrprogramm sind für die Materialforschung optimiert
 - SR-Quelle mit guter Strahlstabilität und hoher Strahllebensdauer ($\tau > 5 \text{ h}$)
 - Nutzerregime ist auf eine kontinuierliche Arbeit von Materialforschern und Zugang aller anderen Interessenten ausgerichtet
- Bei allem wird dafür Sorge zu tragen sein, daß die Nutzungsmöglichkeiten mit anderen Synchrotronstrahlungsquellen abgestimmt sind, um Doppelungen weitestgehend auszuschalten.

Die gegenwärtig durchgeführten Experimente mit Synchrotronstrahlung sind im wesentlichen der Festkörperphysikalischen, chemischen oder auch biologischen Grundlagenforschung zuzurechnen. Die Meßzeit wird nach einem allgemeinen Wettbewerbsprinzip zugeteilt in Erwartung attraktiver wissenschaftlicher Ergebnisse. Dabei erhalten in der Regel Experimente mit geringem Meßzeitbedarf den Vorzug, so daß bestimmte Typen von Experimente kaum eine Realisierungschance haben. Angesichts des allgemeinen Mangels an Meßzeit erfolgt die Auswahl der zu realisierenden Experimente primär nach den Gesichtspunkten der Erarbeitung neuer Methoden oder der Suche nach neuen Effekten.

Diese in der Regel praktizierte Nutzerpolitik an Synchrotronstrahlungsquellen ist für die eigentliche Materialforschung nicht geeignet. Die Materialforschung erfordert im Gegensatz dazu die Untersuchung von Probenserien, deren Einzelexperimente nicht unbedingt attraktive neue Ergebnisse bringen. Erst größere Untersuchungsserien geben wesentliche Erkenntnisfortschritte. Die Serien sind u. a. bedingt durch Variationen in den Herstellungsbedingungen oder in der Werkstoffzusammensetzung. Diese Variationen sind oft klein, was in der Natur der Vorgehensweise bei der Werkstoffentwicklung liegt, da viele Effekte der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen in Werkstoffen nicht linear extrapolierbar sind bzw. es sich um Vielkomponentensysteme handelt. Wegen dieser geringen Zusammenstufungsvariation muß auch in Rechnung gestellt werden, daß durchaus relativ lange Meßzeiten pro Schritt aufgewandt werden müssen. Zusätzlich muß die Möglichkeit einer Probenpräparation am Ort bestehen, was durch die Infrastruktur einer größeren Forschungseinrichtung wie Rossendorf gewährleistet werden kann.

Die Situation in der Werkstoffentwicklung und der Materialforschung ist in gewisser Weise mit der der Proteinkristallographie vergleichbar. Es gibt eine begrenzte Zahl von etwa 6000 Grundbausteinen, deren Struktur jeweils einzeln bekannt sein muß, um den gesamten Mechanismus der Wirkungsweise der Proteine strukturell zu verstehen. Für die Strukturaufklärung folgt daraus, daß zwar das Analyseverfahren keine wissenschaftliche Innovation enthält, nachdem die ersten Proteinstrukturen aufgeklärt wurden, aber alle Proteine einzeln untersucht werden müssen, um zum Gesamtverständnis zu gelangen.

Im oben diskutierten allgemeineren Kontext heißt das, daß eine systematische Anwendung bekannter Methoden zur Untersuchung neuer Eigenschaften und zur Aufklärung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen charakteristisch für die Materialforschung sind. Hierbei sind vor allem Methoden angesprochen, die über die normale Röntgendiffraktion hinausgehen.

Für die Ausstattung der Strahlrohre von ROSY mit Experimentiereinrichtungen sind folgende Vorstellungen vorhanden:

Die *Meßplätze* sind zum größeren Teil fest installiert und sollen Messungen nach standardisierten Verfahren erlauben. Insofern sind sie allen Nutzern zugänglich ("common devices")

Die Auswahl der zur allgemeinen Nutzung angebotenen *Meßverfahren* richtet sich vor allem danach, ob diese entsprechend dem Stand der Technik in Routineanwendungen längere Zeit störungsfrei betrieben werden können, ob sie standardisiert werden können, ob automatisierbare Algorithmen zur Bewältigung von Datenfluß und Datenreduktion existieren und ob ein entsprechender Markt für den Routineeinsatz existiert.

Aus momentaner Sicht sollten die in Tabelle 1.4 aufgeführten *Meßplätze* an ROSY aufgebaut werden, die vordergründig aus den regionalen Interessen herrühren. Diese Aufstellung ist als vorläufig und sicher unvollständig anzusehen und muß im Rahmen der weiteren Konkretisierung des Projektes ausgebaut werden. Nach einer kurzen und ebenfalls unvollständigen Umfrage kommen die angegebenen Institutionen als Betreiber und Betreuer der genannten *Meßplätze* in Frage.

Tabelle 1.4: Vorläufige Liste notwendiger Meßplätze an der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY abgeleitet aus dem regionale Bedarf. Die angegebene Betreiberinstitutionen sind aus heutiger Sicht Interessenten.
(Es wurden bisher noch nicht alle potentiellen Nutzer befragt)

Instrument / Meßmethode	Anzahl	Betreiber
Pulverdiffraktometer (PD) (mit Option anomaler Streuung)		
- Standardgerät	1	TUD
- Hochauflösung	1	IFW
- für nichtkristalline Stoffe	1	TUC
Einkristalldiffraktometer (EKD)	1	TUD
Dünnschichtdiffraktometer (DSD)	2	FZR(1)
energie dispersives Diffraktometer (EDX)	1	IPF
Kleinwinkelstreuung (KWS)	2	TUD, FZR
Absorptionsspektroskopie (XAS)	2	BAF(1)
Röntgentopographie (RTOP)	1	FZR
Oberflächenfluoreszenzanalyse (OFA)	1	FZR
Mikrotomographie (MT)	1	
Röntgen-TEM (RTEM)	1	
Scanning-PE-Mikroskopie (SPEM)	1	Uni L
Möbbauserspektroskopie (MB)	1	FZR(?)

Das Forschungszentrum Rossendorf betrachtet die Errichtung der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I als wesentlichen Beitrag zum Materialforschungsverbund Dresden. Es wird daher davon ausgegangen, daß die Konzeption, der Aufbau und der Betrieb der Experimente (Meßplätze) an einem Teil der verfügbaren Strahlrohre von Gruppen der Materialforschung aus der nahen Umgebung übernommen wird, d.h. das FZR nur einen Teil der Strahlrohre in eigener Regie ausrüstet und betreibt.

Damit werden Betrieb und Nutzung dreigeteilt:

- Maschinenbetrieb
- lokale Experimentverantwortliche (Rossendorf und Dresdner Institute)
- externe Nutzer

Die verfügbare Meßzeit wird dabei ebenfalls geteilt und zwar im wesentlichen in 2 unterschiedliche Qualitäten.

- Meßzeit für die Experimentbetreibergruppen, die in diesem Rahmen frei in der Wahl der Aufgaben sind (den Betreibern ist ein Teil der Meßzeit von vornherein reserviert, das Programm der Gruppe sollte aber in Abständen von 4-5 Jahren extern begutachtet werden),
- Meßzeit, die nach einem Antrags- und Selektionsverfahren allen externen Nutzern zur Verfügung stehen kann.

Hinsichtlich des Antragsverfahrens ist zu prüfen, inwieweit diese Meßzeit nochmals in verschiedene Aufgabengruppen (z.B. Grundlagenforschung, angewandte Forschung, industrielle Forschung) aufgeteilt wird. Zu jeder dieser Aufgabengruppen sind dann auch angepaßte Bewertungskriterien für die Auswahl der zugelassenen Experimente notwendig.

Die Finanzierung der Experimente erfolgt, neben dem bisherigen Verfahren (Förderbereich "Forschung an Großgeräten"), stärker über Verbundprojekte aus den Förderbereichen "Materialforschung", "Physikalische Technologien" u. a. Damit ist auch einer stärkeren Einbeziehung industrieller Forschungseinrichtungen der Weg gebahnt. Der Idealfall wäre, daß an den Projekten neben einem auf dem Gebiet der Materialforschung tätigen öffentlich rechtlichen Institut und einer ortsansässigen Experiment-Gruppe auch Industriefirmen beteiligt sind. Andererseits zeigen Erfahrungen der bisherigen Beteiligung von Industriefirmen an großen Forschungsgeräten, daß sich Nutzungsart und Nutzungsumfang kaum zufriedenstellend vorherbestimmen lassen.

1.5. Potentielle Nutzung der Synchrotronstrahlungsquelle außerhalb der Materialforschung

Die Existenz eines großen Basisgerätes für die Forschung wie es eine Synchrotronstrahlungsquelle darstellt, wird auch für Arbeiten außerhalb der Materialforschung neue Möglichkeiten eröffnen. Im Forschungszentrum Rossendorf ist es naheliegend, Nutzungsmöglichkeiten durch die Kernphysik und die biomedizinisch orientierte Forschung zu prüfen.

Zu einer Nutzung von ROSY I für **kernphysikalische Experimente** sind erste Überlegungen angestellt worden. Generell sind bei der Nutzung von Elektronenstrahlen im GeV-Bereich zur Untersuchung von Kernen und Hadronen zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Die direkte Anwendung der Elektronen als primäre Sonde.

Damit können

- Informationen über die Ladungs- und Übergangsdichten sowie über die Einteilchenorbitale in Kernen und
- Aussagen zu elektromagnetischen Strukturfunktionen freier und gebundener Nukleonen erhalten werden.

2. Die Nutzung der Elektronen zur Produktion von virtuellen oder reellen hochenergetischen Photonen. Die erzeugten Photonen dienen ihrerseits zur

- Untersuchung der Kernstruktur durch Kernresonanzfluoreszenz,
- Produktion von Mesonen (Pionen, Kaonen, Eta-Teilchen, ...) und
- Untersuchung der Wechselwirkung dieser Teilchen mit dem Kern,
- Anregung von Multiquarkzuständen,
- Messung der Impulsverteilung von Protonen und Neutronen im Kern und
- Messung der elektromagnetischen Strukturfunktionen.

Bei einer direkten Anwendung der Elektronen, wie unter 1. genannt, müssen an den Strahl spezifische Anforderungen hinsichtlich Energievariation und -schärfe sowie an die Zeitstruktur und Betriebsart gestellt werden. Diese Bedingungen können in Hinsicht auf die beabsichtigte Hauptnutzung eines Rossendorfer Synchrotrons als Strahlungsquelle für Photonen mit Energien bis zu einigen 100 eV schwerlich ohne Beeinträchtigung des Normalbetriebes erfüllt werden. Zudem stehen in Deutschland mit MAMI (Mainz), ELSA (Bonn) und DALIAC (Darmstadt) Elektronenbeschleuniger zur Verfügung, die für die kernphysikalische Nutzung optimal konzipiert wurden. Daher erscheint es zweckmäßig, wenn sich das Institut für Kern- und Hadronenphysik im FZR auf den unter 2. genannten Bereich konzentriert, wobei die Erzeugung eines hochenergetischen Photonenstrahles notwendig ist. Die für den Elektronenring eines Synchrotrons adäquate Methode der Produktion hochenergeti-

scher Photonen (einige 100 MeV) ist die Laser-Rückstreuung. Dabei nehmen Photonen aus einer Laser-Lichtquelle durch Comptonstreuung an den hochenergetischen Elektronen des Ringes Energie auf. Eine Monochromatisierung des Photonenstrahles ist durch die koinzidente Detektion der gestreuten Elektronen möglich. Eine Quelle dieser Art existiert am 2,5 GeV Elektronenspeicherring in Brookhaven, an der Photonen bis zu 300 MeV erzeugt werden. Für die Rossendorfer Kernphysik würde mit der Realisierung einer solchen Photonenquelle ein interessantes Betätigungsfeld für moderne Experimente zur Untersuchung der Struktur der Kerne und Hadronen geschaffen werden.

Die bei einer Elektronenenergie von 3 GeV bei ROSY mögliche Maximalenergie der Photonen von etwa 420 MeV überdeckt den Bereich zwischen der Brookhaven-Quelle und der an der ESRF geplanten Quelle hochenergetischer Photonen (bis 1,5 GeV).

Bei Nutzung eines solchen hochenergetischen Photonenstrahles ist folgender Kreis von Experimenten denkbar:

A) Messungen mit linear polarisierter γ -Strahlung

- Messung der Energie der Nukleonenresonanzen durch Photonenabsorption: Bei linear polarisierten Photonen ermöglicht die Messung der gestreuten Photonen die Bestimmung der Multipolarität des Überganges und damit die Bestimmung der Quantenzahlen der Nukleonenresonanzen.
- Messung der Nukleonen-Isobar-Übergänge
 $\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$; $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$
- Untersuchung der Deuteron-Photon-Desintegration
 $\gamma + d \rightarrow p + n$
- Untersuchung von Drei-Nukleonensystemen
 $\gamma + {}^3\text{He} \rightarrow p+d$
- Untersuchung der Effekte des Mesonenaustausches in Kernen (Zweikörperströme)
- Studium von Details des Nukleon-Photon-Vertex

B) Messung mit zirkular polarisierter γ -Strahlung

- Unter Benutzung von polarisierten Targets kann man die Spindichte in Mehrteilchensystemen, also z.B. die Spinverteilung der Quarks im Nukleon oder die der Nukleonen im Kern messen.
- Messung der Absorption von polarisierten Photonen an polarisierten Protonen (bisher existieren keine Messungen dieser Art)
- Untersuchung von effektiven Drei-Körperkräften in Mehrteilchensystemen

Hinsichtlich einer Nutzung von ROSY in der biomedizinischen Forschung ist das Institut für Bioanorganische und Radiopharma-

zeutische Chemie im FZR als naheliegendste Einrichtung zu betrachten. Das Institut widmet sich der Entwicklung von radioaktiv markierten Verbindungen, die in bestimmten Organen des Menschen vorzugsweise angereichert werden oder an spezifischen Stoffwechselprozessen teilnehmen. Ziel ist der Einsatz solcher Verbindungen in der medizinischen Diagnostik und Therapie.

Ein wesentlicher Meilenstein des Designs derartiger biorelevanter Verbindungen ist die Aufklärung ihrer atomaren Struktur. Diese Arbeiten mit Röntgendiffraktion werden heute noch außerhalb des FZR ausgeführt. Für die Zukunft ist diese Strukturaufklärung mittels Synchrotronstrahlung ein wichtiges Interessenfeld des Institutes für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie an der Quelle ROSY I. Ganz wesentlich spielt hier die verfügbare hohe Intensität bei der Synchrotronstrahlung eine Rolle, da in der Entwicklungsphase oft nur sehr kleine Mengen der neuen Komplexverbindungen isoliert werden können.

Unterstützend zur Röntgenkristallstrukturanalyse von Radiotracer (organische Moleküle und Komplexverbindungen) kann EXAFS eingesetzt werden. Besonders relevant ist die Methodenkombination wenn nur sehr kleine Probenmengen, etwa nach Isolierung aus biologischem Material, zur Verfügung stehen.

Die biologische Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS) erlaubt die Beurteilung des Verhaltens, des Bindungszustandes und der Reaktivität niedrigster Metallkonzentrationen in biologischem Material. Damit wird die Möglichkeit eröffnet, das Verhalten komplexer Radiotracer zum Beispiel in Enzymzentren zu untersuchen. Die Etablierung dieses Verfahrens, ergänzt durch Methoden wie NMR, EPR und die Anwendung auf Metallkomplextracer würde es erlauben, die Richtung "Tracerbioanorganik" auf höchstem wissenschaftlichen Niveau zu betreiben.

An anderen Synchrotronstrahlungslabors wird bereits die Angiographie, d.h. die nichtinvasive Untersuchung von Strukturen und Funktionsabläufen am Herzen im lebenden Organismus, betrieben. Mit der Methode der Differenzmessung nahe einer Röntgenabsorptionsskante und der hohen Intensität einer Synchrotronstrahlungsquelle kann man die Arbeit des Herzens mit ausreichender Bildschärfe auch zeitlich aufgelöst untersuchen. Derartige Forschungen haben Beziehungen zu Studien der Pharmakokinetik wie sie mit radioaktiven Isotopen in Rossendorf schon länger erfolgreich betrieben werden. Hier ist eine qualitative Erweiterung der Möglichkeiten oder die Eröffnung neuer Felder für die medizinische Fakultät der TU Dresden abzusehen.

Schließlich ist auch von dem in Gründung befindlichen Fachbereich Biologie an der TU Dresden ein Interesse an der Nutzung von hochintensiver Röntgenstrahlung aus einer Synchrotronstrahlungsquelle zu erwarten.

1.6. Einbettung in ein Strahlencentrum Rossendorf

Das Forschungszentrum Rossendorf verfolgt die Absicht, in der Perspektive ein Strahlenforschungszentrum aufzubauen, dessen beide Säulen die Ionenstrahltechnik und die Synchrotronstrahlungsquelle sind. Damit integriert es sich einerseits ergänzend (Ionenstrahlphysik) und andererseits übergreifend (Synchrotronstrahlungsquelle) in die Materialforschung des sächsischen Raumes ein. Die Rolle einer Synchrotronstrahlungsquelle für die allgemeine Materialforschung in der Region wurde bereits dargestellt. Die Ansiedlung von Ionenstrahltechnik und Synchrotronstrahlungsquelle in einem Zentrum verspricht synergetische Effekte, die die Effektivität beider Komponenten wesentlich verstärken werden.

Um Ionenstrahltechniken erfolgreich zur Verbesserung von Materialeigenschaften und zur Entwicklung neuer Materialien, die in ihren Parametern an spezielle Einsatzbedingungen optimal angepaßt sind, einzusetzen, ist ein leistungsfähiges Spektrum analytischer Methoden notwendig. Die Anforderungen an die Diagnostik sind dabei besonders hoch, da durch Ionenbestrahlung nur oberflächennahe Bereiche beeinflußt werden.

Ein aktuelles Merkmal dieser Entwicklung ist das Bestreben in einigen besonders leistungsfähigen Zentren, Möglichkeiten zur in-situ-Diagnostik zu schaffen. Beispiele dafür sind die Kombination von Ionenstrahlmodifizierung und Ionenstrahlanalytik im Oak Ridge National Laboratory [5] sowie im gegenwärtig in Betrieb gehenden Ionenstrahlzentrum in Takasaki (TIARA) [6]. Im Argonne National Laboratory sind zur Zeit die besten Möglichkeiten zum in-situ-Einsatz der Elektronenmikroskopie gegeben (Kombination von zwei Ionenstrahlanlagen mit einem Höchstspannungselektronenmikroskop) [7].

In Takasaki sind ein 3 MV-Tandem-Beschleuniger, ein 3 MeV-Van-de-Graaff-Beschleuniger und ein 400 keV Implanter räumlich so dicht angeordnet, daß verschiedene Probenkammern simultan mit Strahlen von 2 oder auch allen 3 Maschinen erreicht werden. Dadurch ist eine in-situ-Analytik mit hochenergetischen Ionen während der Bestrahlung aus einem der beiden anderen Beschleuniger möglich. Das Themenspektrum der Institution umfaßt die Bereiche Materialien unter hoher Strahlenbelastung, Biotechnologie, neue funktionelle Werkstoffe und Ionenstrahltechnologien. Die Gruppe Ionenstrahlanalytik ist zum Beispiel dem Bereich neue funktionelle Werkstoffe zugeordnet und hat die Aufgabe, die Prozesse der Ionenimplantation, des Ionenstrahlmischens und des Ionenstrahlsputters in ihrem Ablauf zu untersuchen.

In Oak Ridge stehen in ähnlicher Weise drei Ionenbeschleuniger (5 MV, 2,5 MV und 400 keV) zur Verfügung, deren Strahlen auf ein Target gerichtet sind. Hauptarbeitsgebiet ist die Entwicklung und Testung strahlenresistenter Materialien. Dafür ist es wichtig, daß mehrere unterschiedliche Ionenarten im entsprechenden Massebereich simultan in die gleiche Tiefe einer Probe implantiert werden können.

Die Beschleuniger in Argonne liefern ein breites Spektrum von Ionenarten mit Energien von 25 keV bis 8 MeV. Die Kombination von Höchstspannungselektronenmikroskopie (HVEM) und Ionenbeschleunigern gestattet in einmaliger Weise Ionenbestrahlungs- und -implantationsexperimente bei simultaner Mikroskopie. Die HVEM-Tandem-Anlage wird für viele Gebiete der Materialforschung genutzt, darunter in-situ-Studien mechanischer Eigenschaften, Oxidations- und Wasserstoffdefekte in Metallen, Strahlungseffekte einschließlich Ionen- und elektroneninduzierter Phasenumwandlungen und allgemeine Defektstudien.

Die Möglichkeit zur in-situ-Diagnostik mit Synchrotronstrahlung während der Ionenbestrahlung ist in der Welt noch nicht vorhanden. Das Rossendorfer Projekt würde Deutschland hier eine sehr attraktive Führungschance bieten.

Die Nutzung von Synchrotronstrahlung als analytisches Instrument im Zusammenhang mit der Materialmodifizierung durch Ionenstrahlung hat enorme Zukunftschancen. Erst die niedrigen Strahldivergenzen unter $50 \mu\text{nmrad}$ (etwa bei Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation) bieten gute Voraussetzungen für die Diagnostik an Ionenstrahlmodifizierten Materialien mit entsprechender Tiefenauflösung. Die für den Rossendorfer Speicherring ROSY I vorgeschlagenen Parameter werden den Anforderungen einer Oberflächen-, Dünnschicht- und Grenzflächenanalytik weitestgehend gerecht.

Die Analytik mit Ionenstrahlen und Röntgenstrahlen (Synchrotron) kann in vielen Fällen komplementär eingesetzt werden, denn unterschiedliche Wechselwirkungsmechanismen führen zu den spezifischen experimentellen Aussagen. Die größere Leistungsfähigkeit der Synchrotronstrahlung gegenüber der Ionenstrahlanalytik liegt z.B. darin, daß sie neben einer Elementanalyse auch Aussagen zur strukturellen Anordnung der unterschiedlichen Elemente sowohl im Nahordnungs- als auch im Fernordnungsbereich bietet. Da die Elementanalyse mit Ionenstrahlen oft genauere Daten liefert (besonders bei leichten Elementen) erschließt die simultane Nutzung von Ionen- und Synchrotronstrahlen völlig neue Einsatzfelder.

Gegenüber der Elektronenmikroskopie ist als wesentlicher Vorteil die Mittelung über ein größeres Probenvolumen hervorzuheben. Über

die atomare Struktur hinaus wird die Bestimmung von Strukturanteilen, die die Synchrotronstrahlung über die Analyse der Kleinwinkelstreuung liefert, möglich. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, daß die Beschränkung auf speziell abgedünnte Proben wegfällt. Damit wird eine komplexe Untersuchung der Phasenbildung in oberflächennahen und vergrabenen Schichten wie auch der Grenzflächen zwischen den neuen Phasen und dem Targetmaterial erst mit hoher Zuverlässigkeit möglich. Weiterhin können durch gezielte Anregung von Elektronenzuständen mittels Synchrotronstrahlung (Röntgenfluoreszenz) Aussagen zu Bindungsverhältnissen gewonnen werden.

Neben dem oben erwähnten neuen Aspekt der in-situ-Diagnostik ist davon auszugehen, daß der ständige unmittelbare Kontakt der Analytiker mit den problemorientiert arbeitenden Wissenschaftlern eine höhere Effektivität beider Seiten ergibt. Die Synchrotronstrahlungsquelle wird in starkem Maße von externen Partnern genutzt, die mit Methoden und Verfahren der Dünnschichttechnologie arbeiten, die in Rossendorf nicht vorhanden sind. Das wird die Verflechtung der Ionenstrahltechniken mit dem Gesamtbereich der Dünnschichttechnologien fördern.

Ionenstrahlung kann nicht nur zur Verbesserung von Werkstoffeigenschaften genutzt werden. Bei der Entwicklung und Testung strahlenresistenter Konstruktionswerkstoffe für den Einsatz in Fusion- und Spaltreaktoren oder im Weltraum sind sie ein wertvolles Hilfsmittel. Im Argonne National Laboratory ist ein sehr wesentlicher Teil des Programms, der in der Kombination Ionenbestrahlung - Elektronenmikroskopie bearbeitet wird, dieser Problematik gewidmet. Gleiches ist für das im japanischen Zentrum Takasaki vorgesehene Programm bezüglich der Kombination mehrerer Ionenstrahlen festzustellen. Die oben im Hinblick auf die Ionenstrahlmodifizierung angeführten Argumente für den vorteilhaften Einsatz analytischer Verfahren auf der Basis von Synchrotronstrahlung gelten in vollem Umfang auch für diese Arbeitsrichtung. Beim weiteren Ausbau der Strahlenforschung in Rossendorf sollten Arbeiten zur Strahlenschädigung von Werkstoffen in das Programm aufgenommen werden, da Sicherheitsforschung bereits ein Bestandteil des Forschungszentrums ist und diese Problematik in Deutschland gegenwärtig kaum bearbeitet wird.

Schließlich verspricht die Kombination von Ionenstrahlanalytik und Synchrotronstrahlung synergetische Effekte. Die Verfügbarkeit beider methodischer Richtungen wird die Erfolgsaussichten bei der Lösung komplexer Probleme erhöhen.

2. Das technische Konzept für ROSY und seine Einordnung

Für den Raum Dresden wird eine Synchrotronstrahlungsquelle benötigt, die überwiegend im Röntgenstrahlungsbereich emittiert, da Untersuchungen der geometrischen Struktur von Werkstoffen mittels Beugungsverfahren im Vordergrund stehen. Gleichzeitig sollten aber spektroskopische Arbeiten an einigen Strahlrohren möglich sein. Einen weiteren Schwerpunkt werden die auf geringer Emittanz basierenden Techniken zur Untersuchung von Oberflächen und Grenzflächen bilden, die Spektroskopie in Kombination mit Interferenzeffekten (Totalreflexion, stehende Wellen) nutzen.

Die Forderungen an die Qualität der Strahlung sind durch die vielschichtigen und komplexen Fragestellungen der Festkörper- und Oberflächenphysik sehr hoch, auch bezüglich des Aufwandes an Meßzeit, da in der Regel eine Vielzahl von Probenparametern zu variieren ist.

Daher ist eine Synchrotronstrahlungsquelle mit niedriger Emittanz und hoher Brillanz bei verschiedenen Wellenlängen notwendig, die das Spektrum der Synchrotronstrahlungsquellen in der Bundesrepublik Deutschland und Europa ergänzt.

Es wird vorgeschlagen, die Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I als dedizierte Quelle vornehmlich für die Materialforschung zu errichten.

Der Speicherring ROSY I soll mittelfristig für die Forschung und industrielle Anwendung Synchrotronstrahlung zur Verfügung stehen. Mit einer Elektronenenergie von 3 GeV gehört ROSY I von der Größe in die Kategorie von Maschinen, wie sie für Bonn [8], Karlsruhe [9] und Mainz [10] vorgeschlagen wurden. Bei einer Emittanz von $\leq 40 \text{ } \mu\text{nmrad}$ liegt sie an der Grenze zu Maschinen der 3. Generation und hebt sich damit von den Projekten in Mainz und Karlsruhe ab.

Längerfristig ist dann der Ausbau durch Schaffung einer Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation (ROSY II), die Synchrotronstrahlung im Röntgengebiet mit hoher Brillanz und sehr kleiner Emittanz ($3 \text{ } \mu\text{nmrad}$) zur Verfügung stellt möglich.

Die Trennung der beiden Projekte verfolgt einerseits das Ziel schnell eine Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung im Raum Dresden zur Verfügung zu haben und andererseits einen sinnvollen größeren Entwicklungszeitraum für die Quelle der 3. Generation zu gewährleisten. Bei letzterem spielt auch der Aspekt der Nutzung von Betriebserfahrungen der jetzt im Bau befindlichen Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation eine Rolle.

2.1. Wesentliche Parameter für ROSY

An dieser Stelle soll das Konzept für ROSY nur kurz erläutert werden. Der gegenwärtige Stand des Projektes ist, zusammen mit physikalisch-technischen Details, im Teil II ausführlich dargestellt.

Die Hauptparameter der Speicherringanlage wie Energie (E), Ablenkradius (R) und magnetische Flußdichte (B) in den Ablenkmagneten sind durch das geforderte Spektrum der Synchrotronstrahlung bestimmt. Die Parameter die das kontinuierlichen Spektrums der Synchrotronstrahlung beschreiben sind die kritische Wellenlänge λ_c oder die kritische Photonenenergie E_c . Die Abhängigkeit dieser Größen von den Maschinenparametern ist durch die folgenden Formeln gegeben:

$$\lambda_c[\text{nm}] = 1.864 / [(B/T) \times (E/\text{GeV})^2] \quad (1)$$

$$E_c[\text{keV}] = 0.665 \cdot (B/T) \times (E/\text{GeV})^2 \quad (2)$$

Aufgrund der Forschungsschwerpunkte, die durch diese Anlage bedient werden sollen, muß vorwiegend Synchrotronstrahlung im Energiebereich von 5 - 18 keV ($E_c = 9$ keV) emittiert werden. Wird die Ablenkung des Elektronenstrahles mit normaleitenden Magneten durchgeführt ($1 \text{ T} \leq B \leq 1,5 \text{ T}$), so liegt die erforderliche Energie des Speicherringes bei $E = 3$ GeV.

Der Speicherring ROSY I ist in Abb. 2.1. dargestellt. Er kann bis zur Energie von 3,2 GeV betrieben werden. Bei einer nominellen Energie von 3,0 GeV und einem Magnetfeld von 1,4 T in den Ablenkmagneten wird von den gespeicherten Elektronen Synchrotronstrahlung mit einer kritischen Wellenlänge von $\lambda_c = 0,15$ nm emittiert. Das entspricht einer kritischen Energie von 8,38 keV. Die Emittanz beträgt mit der vorgeschlagenen Magnetstruktur etwa 40π nmrad. Das ist etwa eine Größenordnung kleiner als bei den jetzigen Strahlungsquellen im mittleren Röntgenbereich DORIS III oder SPEAR.

ROSY I ist mit insgesamt 20 Ablenkmagneten aufgebaut, aus denen Strahlrohre für Experimente ausgeführt werden können. Pro Strahlrohr kann in der Regel mehr als ein Experiment aufgebaut werden, so daß über 40 Experimentierstationen ausgerüstet werden könnten.

Der Speicherring hat eine Vierersymmetrie der Magnetstruktur. Zur Erreichung kleiner Emittanzen (bezogen auf den Umfang) wird die Ablenkung mit 2 verschiedenen Magneten durchgeführt. Magnete mit einer Ablenkung von $22,5^\circ$ in der Mitte und mit einer Ablenkung

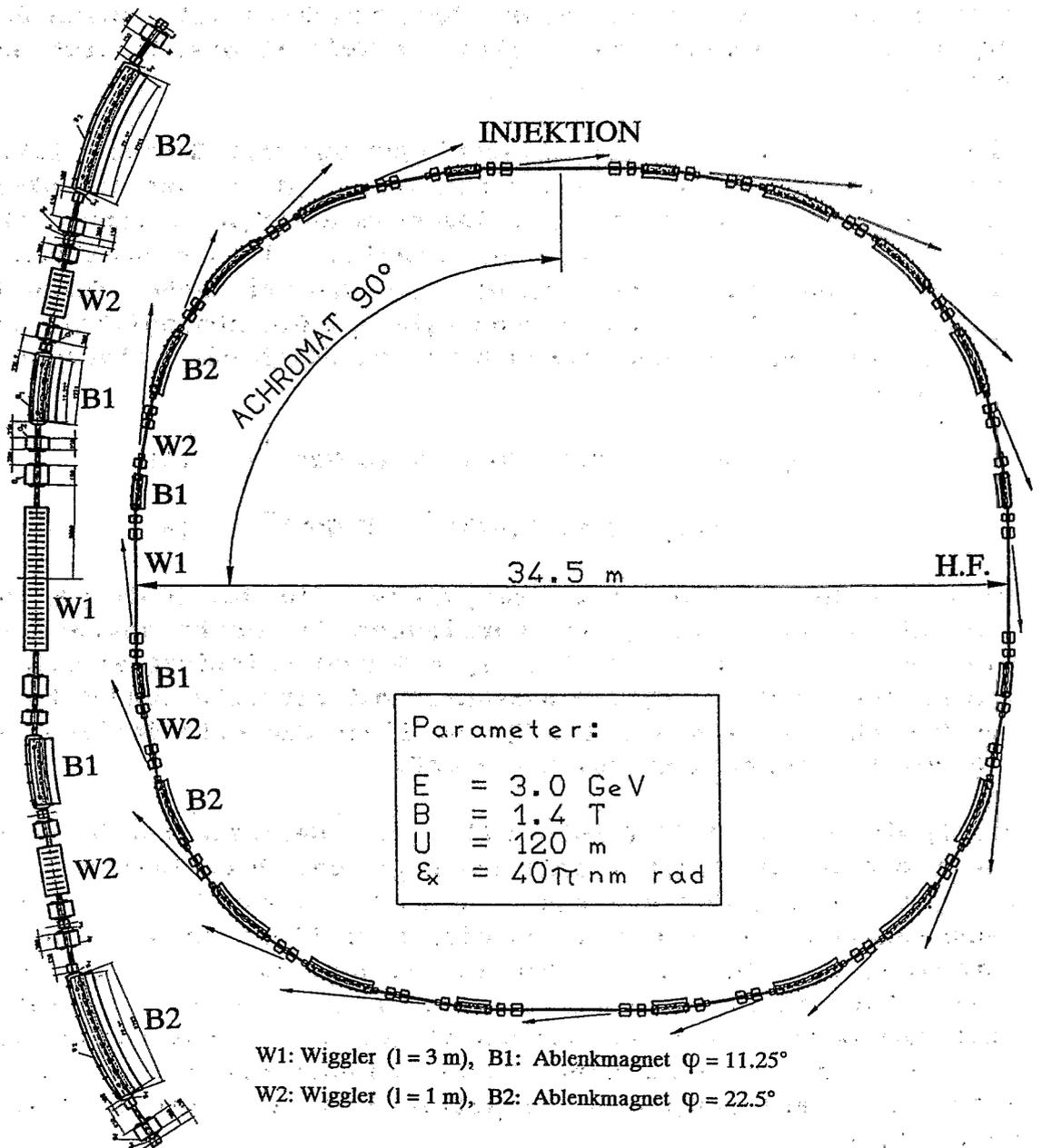


Abb. 2.1: Darstellung der Magnetstruktur der Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I. Im linken Bildteil ist ein vergrößerter Ausschnitt gezeigt, wobei in den geraden Abschnitten Wiggler eingezeichnet sind.

von $11,25^\circ$ am Anfang und Ende des Achromaten. Genauere Erläuterungen zur Anordnung der Magnete erfolgen im Abschnitt 2.2. und im Teil II. Bei der Vierersymmetrie werden 2 gerade Strecken für die Strahlinjektion und die Leistungszuführung (HF-Cavity) benötigt, so daß nur 2 gerade Strecken von 4m Länge für den Einbau großer Wiggler und/oder Undulatoren* zur Verfügung stehen.

Für die in Abb. 2.1 dargestellte Konstruktion des Speicherringes ROSY I wurde untersucht, inwieweit sich in die kürzeren geraden Stücke zwischen den Ablenkmagneten innerhalb des Achromaten kleinere Wiggler einbauen lassen. Der maximale Abstand zwischen den Quadrupolen im Achromaten ist 1,4m. Bei einer Periodenlänge von $\lambda_0 = 125$ mm können in diesem Bereich Wiggler mit mindestens 16 Polen untergebracht werden. Es stehen 8 solche Bereiche zur Verfügung. Hiervon können jedoch nur 6 für den Einbau von Mini-Wiggler genutzt werden, da 2 Plätze für Injektionselemente (Kicker) vorzusehen sind.

Die entscheidende Größe für den Experimentator ist die Intensität am Austrittsspalt für den Monochromator. In Abb. 2.2 sind die bei einem Strom von $I = 100$ mA erreichbaren Photonenströme $N_{\Delta\lambda} = \text{Photonen}/(\text{Sekunde} \cdot 0,1\% \text{ Bandbreite})$ wiedergegeben. Berechnet wurden die Daten für folgende Strukturen:

- Ablenkmagneten (horizontale Akzeptanz $\theta = 15$ mrad)
- Wiggler 1: 3m Länge ($\lambda_0 = 125$ mm, $N_{\text{pole}} = 48$, $\theta = 6$ mrad)
- Wiggler 2: 1m Länge ($\lambda_0 = 125$ mm, $N_{\text{pole}} = 16$, $\theta = 6$ mrad)

Wie aus Abb. 2.2 zu entnehmen ist, ist der Photonstrom bereits für den kurzen Wiggler 2 etwa um einen Faktor 6 größer als der aus den Ablenkmagneten. Der lange Wiggler 1 läßt einen Gewinnfaktor von 20 im Photonstrom erwarten.

Beim Einbau von Undulatoren ($l = 3$ m, $\lambda_0 = 35$ bis 50 mm) ergeben sich Photonenströme in der gleichen Größenordnung wie bei den Wiggler, jedoch ist der von den Undulatoren abgedeckte Spektralbereich stark eingeschränkt, so daß oberhalb von 6-8 keV kein ausreichender Photonstrom mehr zur Verfügung steht. Ebenfalls ist eine Durchstimmbarekeit des Spektrums mit Undulatoren komplizierter als mit Wiggler. Weitere Einzelheiten sind dem Teil II zu entnehmen.

* Wiggler und Undulatoren sind Magnetstrukturen in denen viele kleine Ablenkmagneten entlang des Elektronenstrahles angeordnet sind. Dadurch "schwingt" der Strahl im Bereich dieser "insertion devices" und an den starken Bahnkrümmungen entsteht Synchrotronstrahlung, deren Intensität sich in Richtung des Elektronenstrahles addiert. Dadurch kommt es zu einer merklichen Intensitätserhöhung im Vergleich zu Ablenkmagneten. (siehe Teil II für Details)

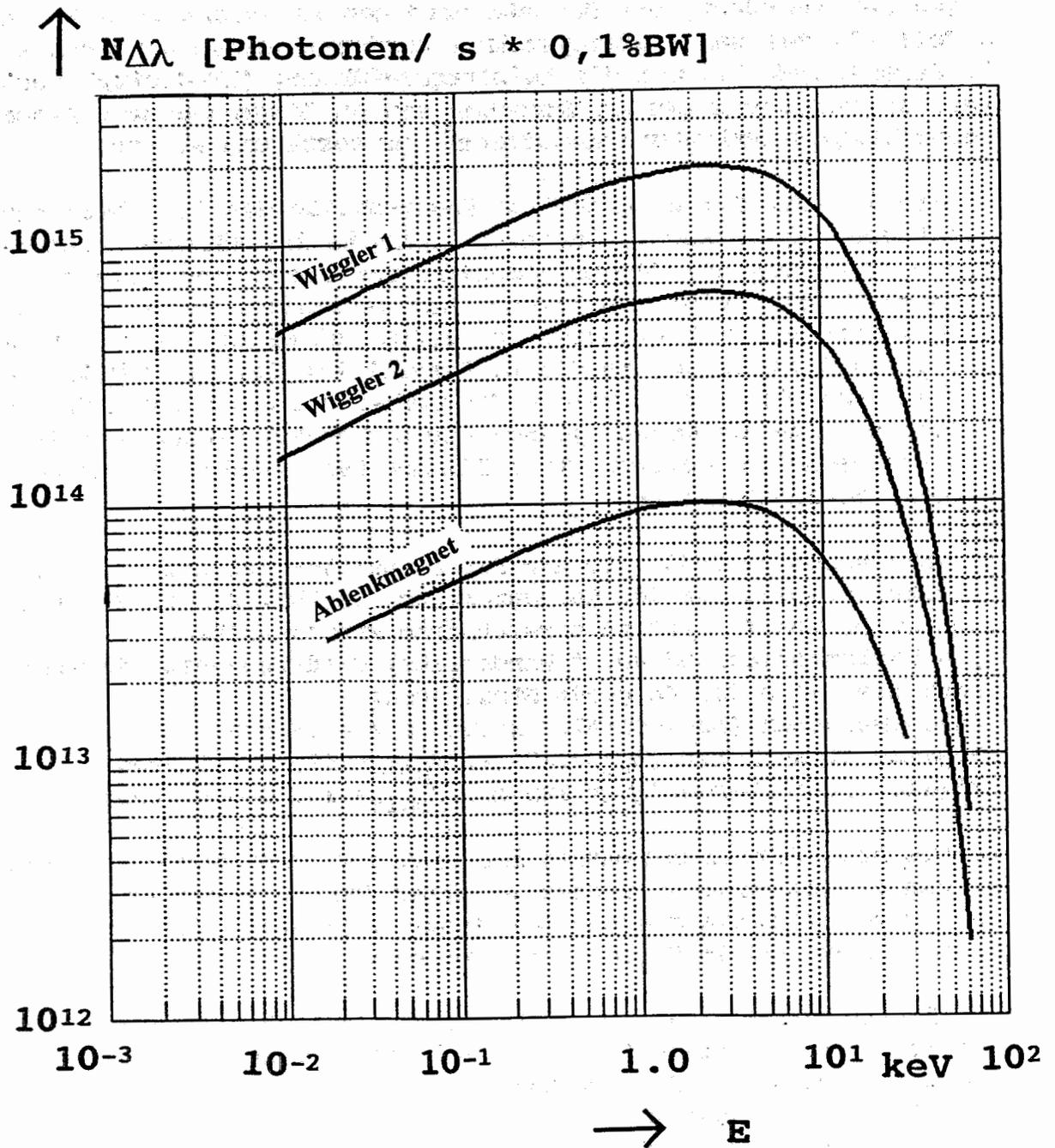


Abb. 2.2: Berechnete Photonenströme $N_{\Delta\lambda}$ für einen Strom von $I = 100$ mA aus Ablenkmagneten und Wiggler von 3m Länge (1) und Mini-Wiggler von 1m Länge (2) (horizontale Akzeptanzwerte: $\theta(\text{AM}) = 15$ mrad; $\theta(\text{W1}) = 6$ mrad; $\theta(\text{W2}) = 6$ mrad)

Mit diesen Charakteristika ist ROSY I eine Synchrotronstrahlungsquelle, die zwischen der zweiten und dritten Generation liegt. Merkmale von Maschinen der dritten Generation (siehe auch Anhang B) sind Emittanzen $\leq 40 \text{ } \mu\text{nmrad}$ und viele Wiggler und Undulatoren als Hauptquellen der Synchrotronstrahlung. Mit einer Emittanz von $40 \text{ } \mu\text{nmrad}$ liegt ROSY I an der Grenze zu Maschinen der 3. Generation. Andererseits können bis zu 8 Wiggler eingebaut werden.

Bereits am kleinen Ring können eine Reihe für die Materialforschung wesentlicher Experimente aufgebaut werden. Er kann sowohl für Arbeiten auf dem Gebiet der angewandten Forschung als auch für Grundlagenuntersuchungen eingesetzt werden. Synchrotronstrahlung der Wellenlänge $0,15 \text{ nm}$ ist für die industrielle Nutzung sehr interessant, so daß beispielsweise bei einem geeigneten Ausbau von einzelnen Strahlrohren auch Arbeiten auf dem Gebiet der Mikrostrukturtechnik (LIGA-Verfahren) möglich wären.

Die vorgeschlagene Variante ROSY I kann somit auch als selbständige Synchrotronstrahlungsquelle über längere Zeit für eine größere Nutzergemeinschaft betrieben werden.

Bei der Erarbeitung der Magnetstrukturen für ROSY I wurde davon ausgegangen, daß durch den Rückgriff auf eine Reihe von konstruktiven Elementen, die in anderen Synchrotronstrahlungslabors im In- und Ausland erprobt werden eine Neukonstruktion der verschiedenen Komponenten vermieden werden sollte. Dies bedeutet nur eine Neukonzeption des Polprofils im Ablenkmagneten. Alle anderen Komponenten, wie Quadrupole, Sextupole, Cavity, Steerer, Vakuumsystem, Kontrollsystem usw. können von anderen Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation übernommen werden. Es liegen hinreichende Erfahrungen vor. Mit den zahlreichvorliegenden Erfahrungen ist es möglich ROSY I in einem Zeitraum von 3 - 4 Jahren zu erstellen.

Bei der Entscheidung für bestimmte technologische Lösungen wird immer der Gesichtspunkt des zuverlässigen Betriebes und hohen Verfügbarkeit der Quelle im Vordergrund stehen.

In Abb. 2.3 ist die Gesamtanlage ROSY I einschließlich der Experimentierhalle dargestellt. Den einzelnen Strahlen aus den Ablenkmagneten sind in diesem Beispiel die Experimente entsprechend Tabelle 1.4 zugeordnet. Man sieht, daß die einfache Auslastung der Strahlrohre ohne weiteres möglich sein wird.

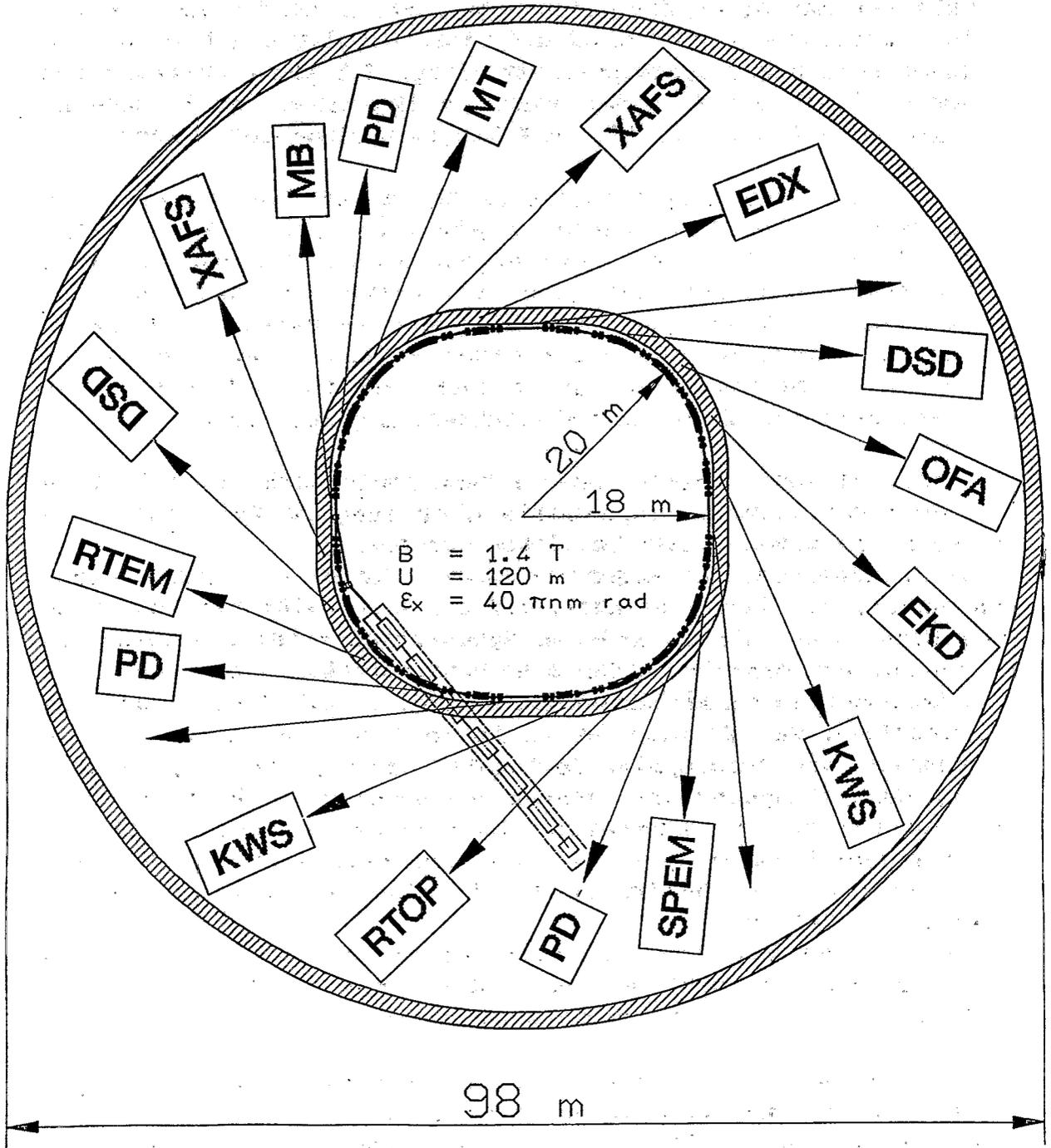


Abb. 2.3: Gesamtanlage ROSY I mit Zuordnung der Strahlrohre aus den Ablenkmagneten zu Experimenten entsprechend Tabelle 1.4

Die Elektronen werden von einem Linearbeschleuniger bei 300 MeV in den Speicherring ROSY I injiziert. Nach der Füllung des Ringes werden diese in Zeiträumen von einigen Sekunden bis auf ihre Endenergie beschleunigt. Mit dem Linearbeschleuniger als Injektor ergibt sich auch die Möglichkeit, Positronen in ROSY I zu speichern. Hierdurch wird die Lebensdauer des gespeicherten Strahles um den Faktor 2-3 vergrößert.

Die wesentlichen technischen Parameter der Anlage sind nochmals in Tabelle 2.1 zusammengefaßt.

Tabelle 2.1: Parameter der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY

Speicherring ROSY I	
E_c (keV)	8,38
λ_c (nm)	0,15
Speicherringstruktur	FODO (modifiziert)
Elektronenenergie (GeV)	3,0
Injektionsenergie (GeV)	0,3
Speicherringumfang (m)	120
max. Elektronenstrom (mA)	100
Strahllebensdauer (h)	5
Anzahl Symmetriezellen	4
nat. Emittanz (π mrad)	40×10^{-9}
nat. Energiebreite	0,11%
Momentum Compaction Factor	$1,1 \times 10^{-2}$
Hochfrequenz (MHz)	500
Arbeitspunkte Q_x/Q_z	7,618/3,255
nat. Chromatizität ξ_x/ξ_y	-13,2/-5,6
Biegeradius auf Orbit (m)	7,15
B_{max} auf Orbit	1,4
Undulatoren / Wiggler	
Zahl der möglichen Plätze	8
Länge der geraden Strecken (m)	4 / 1
Vorinjektor	
Energie Linac (MeV)	300
Hochfrequenz (GHz)	3
Pulsstrom (mA)	10
Wiederholrate (Hz)	10

2.2. Magnetstrukturen der Speicherringe ROSY I und ROSY II

Zur Erfüllung der Anforderungen der Materialforschung an eine Synchrotronstrahlungsquelle muß neben den Hauptparametern des Speicherringes, die das Spektrum beschreiben, eine Magnetstruktur erarbeitet werden, die einerseits eine relativ kleine Emittanz ergibt und andererseits genügend Platz für den Einbau von Wiggeln bereitstellt. Wie oben bereits ausgeführt, sind die Hauptparameter zur Erzeugung des gewünschten Spektrums mit $E = 3 \text{ GeV}$ und $B = 1,4 \text{ T}$ festgelegt.

Die Emittanz eines gespeicherten Elektronenstrahles ist gegeben durch die Energie E (beschrieben durch $\gamma = E/m_0 c^2$), dem Ablenkwinkel ϕ der Magnete und durch den Verlauf der den Beschleuniger beschreibenden Maschinenfunktion [Amplituden- oder Betatron- und Dispersionsfunktion ($\beta_x(s)$ und $\eta_x(s)$)]. Diese wiederum sind durch die Magnetstruktur des Speicherringes bestimmt. Die kleinstmögliche erreichbare Emittanz ist [11, 12]:

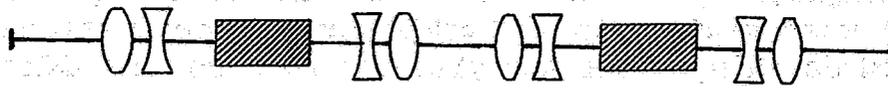
$$\epsilon_x(\text{min}) = \frac{c_q \gamma^2 \phi^3}{12 \sqrt{15} J_x} \quad (3)$$

Hierbei sind $c_q = 3.84 \cdot 10^{-13} \text{ m}$ und J_x die Dämpfungsfunktion in x-Richtung (siehe Teil II). Diese minimale Emittanz wird erreicht, wenn die β_x -Funktion in der Mitte des Ablenkmagneten ein Minimum durchläuft. Dies hat den weiteren Vorteil, daß sich auch für den Strahlquerschnitt ($\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x * \beta_x}$) ein Minimum in den Ablenkmagneten und somit für die Photonenstrahlung ein Maximum ergibt [13].

Die bisherigen Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation würden mit einer DBA-Struktur (ELETTRA [14], ESRF [15]) oder einer TBA-Struktur (ALS [16]) aufgebaut. Die Anordnungen der Ablenkmagneten und Quadrupole in diesen Magnetstrukturen sowie die theoretisch erreichbaren minimalen Emittanzen sind in Abb. 2.4 zusammengestellt. In Realität lassen sich die in der Abb. 2.4 angegebenen minimalen Emittanzen bis auf Faktoren zwischen 2 - 4 erreichen [17]. Insgesamt ergibt sich aber eine Differenz zwischen der minimalen und der erreichbaren Emittanz vom Faktor 5 bis 10.

Für die Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I wird eine neuartige Magnetstruktur vorgeschlagen, um möglichst die minimale Emittanz nach Gl. (3) zu erreichen. Bei dieser Magnetstruktur wird der Ablenkmagnet als "combined-function"-Magnet ausgelegt, d.h. neben der ablenkenden besitzt er eine defokussierende Komponente.

DOUBLE BEND ACHROMAT CELL (DBA)



φ_0
45%

φ_0
45%

$$\epsilon_x = C_q \cdot \gamma_0^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \frac{1}{4\sqrt{15}} \varphi_0^3$$

TRIPLE BEND ACHROMAT CELL (TBA)



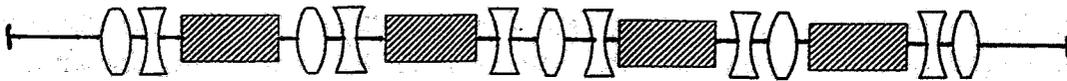
φ_0
42.9%

φ_0
14.3%

φ_0
42.9%

$$\epsilon_x = \frac{1}{1.29} \cdot C_q \cdot \gamma_0^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \frac{1}{4\sqrt{15}} \varphi_0^3$$

QUADRUPOL BEND ACHROMAT CELL (QBA)



φ_0
37.5%

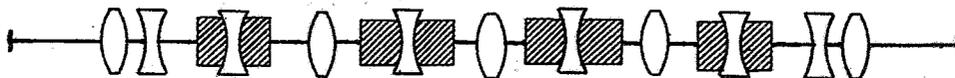
φ_0
12.5%

φ_0
12.5%

φ_0
37.5%

$$\epsilon_x = \frac{1}{1.5} \cdot C_q \cdot \gamma_0^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \frac{1}{4\sqrt{15}} \varphi_0^3$$

MODIFIED QUADRUPOL BEND ACHROMAT CELL (QBA-mod)



$\varphi_0/2$
7.9%

φ_0
42.1%

φ_0
42.1%

$\varphi_0/2$
7.9%

$$\epsilon_x = \frac{1}{3.79} \cdot C_q \cdot \gamma_0^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \frac{1}{4\sqrt{15}} \varphi_0^3$$

Abb. 2.4: Magnetstrukturen für den Aufbau von Synchrotronstrahlungsquellen

Hierdurch erübrigt sich der defokussierende Quadrupol zwischen den Ablenkmagneten (Kostensparnis) und die Dämpfungsfunktion J_x in Gl. (3) wird größer als 1 (Verkleinerung der Emittanz). Weiterhin wird der Ring nicht aus gleichen sondern aus Ablenkmagneten mit 2 verschiedenen Längen aufgebaut. Der Magnet in der Einheitszelle mit einem Ablenkwinkel ϕ und einer in den Anpassungszellen mit dem Winkel $\phi/2$ (siehe Abb. 2.4). Diese Magnetstruktur ist bei insgesamt 4 Ablenkmagneten im Achromaten als "Modified Quadrupole Achromat = QBA-mod eingeführt worden [25]. Wird die Anzahl der Magneten größer als 4, so ist es angemessener diese Magnetstruktur als modifizierte FODO-Struktur (FODO-mod) bezeichnet.

In Abb. 2.4 sind die theoretischen Beiträge der verschiedenen Magnete zur Emittanz angegeben. Bei der TBA- und der QBA-Struktur machen die Anpassungsmagnete einen Beitrag von 85,5 % (TBA) bzw. 75 % (QBA) zur Emittanz aus, d. h. diese Strukturen sind DBA-dominiert. Der Einfluß des Anpassungsmagneten auf die Emittanz kann nur dadurch vermindert werden, wenn der Ablenkwinkel θ ($\epsilon_x \sim \phi^3$) verkleinert wird. Aufgrund der Anpassungsbedingungen zwischen der Einheitszelle und der langen geraden Strecke ist es sinnvoll, diesen in etwa $\phi_0/2$ zu wählen. Damit wird der Beitrag dieses Magneten zur Emittanz um den Faktor $2^3 = 8$ vermindert. Mit dieser Aufteilung der Ablenkwinkel reduziert sich nach Abb. 2.4 der Beitrag des Anpassungsmagneten zur Emittanz auf kleiner als 10 % und die Emittanz ist durch die mittleren Magnete, die Magnete der Einheitszellen bestimmt. Als Kompromiß zwischen kleiner Emittanz und Kompaktheit wird vorgeschlagen den Achromaten von ROSY I aus 3 Einheitszellen mit einer Ablenkung von $22,5^\circ$ und 2 Anpassungszellen von $11,25^\circ$ (siehe Abb. 2.5).

Im Verhältnis zu der sich jetzt im Bau befindlichen Maschinen der 3. Generation führt die hier vorgeschlagene modifizierte FODO-Struktur zu Emittanzen, die um den Faktor 5 - 7 kleiner sind. Andere Maschinenparameter, wie z. B. die Chromatizität, bleiben jedoch moderat. Bei einem Umfang von 120 m wird bei ROSY I eine Emittanz von $\epsilon_x = 40 \text{ nmrad}$ erreicht. Die Parameter der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt und der Vergleich mit anderen Quellen ist in Tabelle 2.2 durchgeführt.

2.3. Die Ausbauvariante ROSY II

Im weichen Röntgenbereich stehen mit den im Bau und in der Planung befindlichen und Speicherringen bald eine große Anzahl von Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation zur Verfügung. Ebenfalls ist mit der ESRF eine Quelle der 3. Generation im harten Röntgenbereich vorhanden. Eine Lücke ergibt sich weltweit im mittleren Röntgenbereich, der nirgends mit einer Hochbrillanz-Maschine abgedeckt wird. Eine entsprechende Quelle könnte eine Energie um 3 GeV und eine Emittanz unter $5 \mu\text{nmrad}$ haben. Insgesamt sollten mit ROSY II die Spezifikationen einer beugungsbegrenzten Synchrotronstrahlungsquelle [25] möglichst erreicht werden.

In diesem Sinne bietet sich ein späterer Ausbau der Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle mit einem großen Ring ROSY II an.

ROSY II ist eine Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation, wobei eine neuartige Magnetstruktur der Achromaten (QBA) zur Erreichung kleiner Emittanzen und hoher Brillanzen vorgeschlagen wird (siehe Teil II). Es wird bei der Energie von 3,2 GeV, einem Magnetfeld von 1,33 T und einer Ablenkung pro Magnet von 10 Grad eine Emittanz von $3,4 \mu\text{nmrad}$ erreicht. Die kritische Wellenlänge würde bei 0,14 nm liegen. Für ROSY II wird eine Periodizität $P = 12$ vorgeschlagen. Abzüglich dem Platzbedarf für die HF-Cavities und die Injektionen verbleiben 10 Plätze für den Einbau von Wiggeln und Undulatoren (entsprechend ALS [16] und ELETTRA [14]). Bei dieser Konzeption hat ROSY II einen Umfang von 300 m. Weiterhin ist vorgesehen, an 28 Ablenkmagneten Strahlrohre aufzubauen. Bei einer maximalen Länge der Strahlrohre von 40 m ergibt sich ein äußerer Durchmesser der Experimentierhalle von rund 130 m. Für weitere Details sei auf Teil II verwiesen.

Jeder Speicherring, der als SR-Quelle der 3. oder 4. Generation betrieben wird, muß mit Elektronen der nominellen Energie gefüllt werden, damit die gewünschten Strahlbedingungen auch erfüllt werden. Mit ROSY I steht für ROSY II ein solcher Injektor dann bereits zur Verfügung, da ROSY I, mit maximalen magnetischen Flußdichten von 1,5 T betrieben, eine Energie von 3,2 GeV erreicht.

Der mögliche Endausbau der Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle ist in Abb. 2.6 dargestellt.

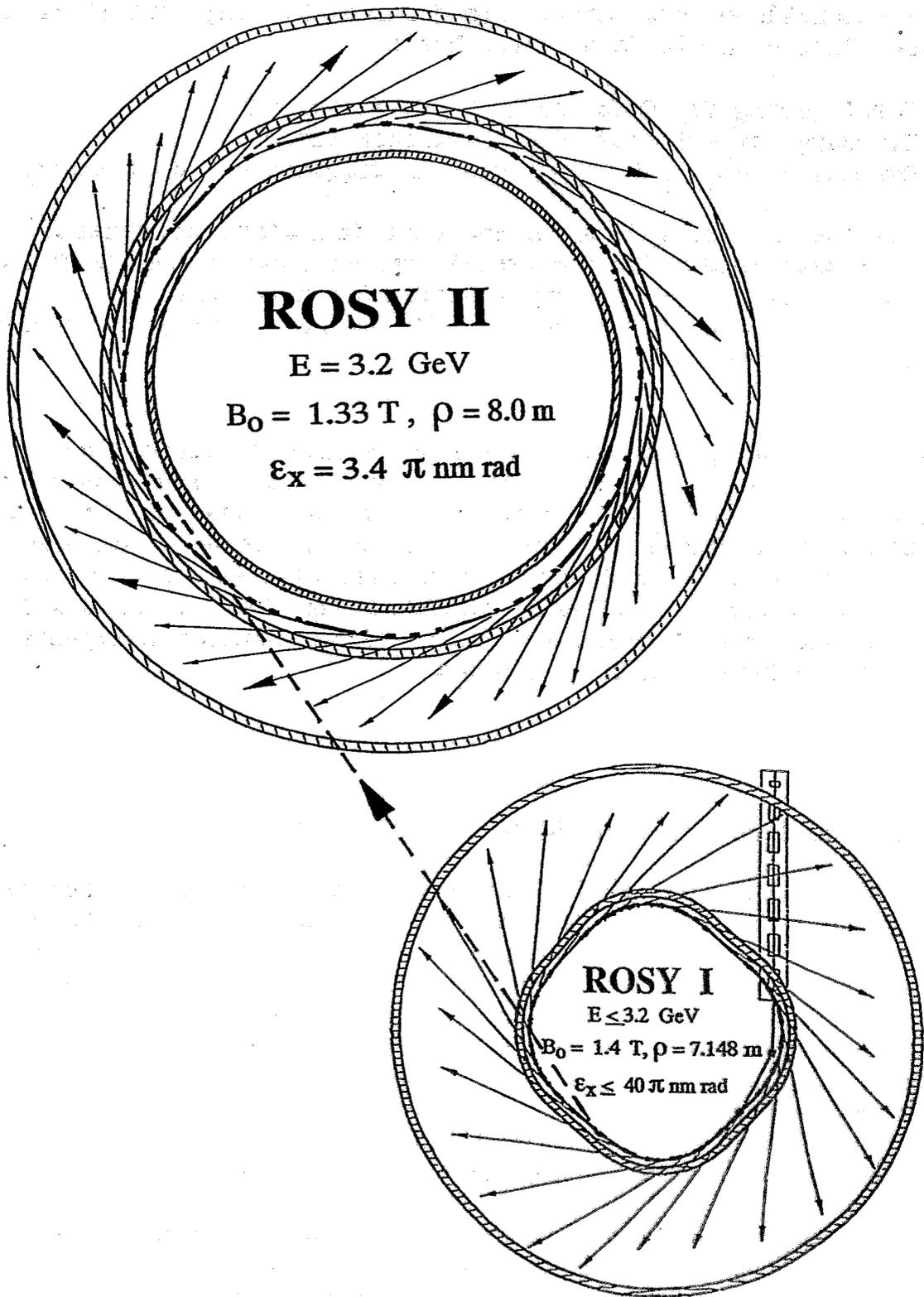


Abb. 2.6: Vision eines möglichen späteren Ausbaus von ROSY

Der wesentliche Fortschritt, den der Speicherring ROSY II bringen wird, läßt sich wie folgt bezeichnen:

- Verringerung der Emittanz um 1 Größenordnung
- Erhöhung der Brillanz um 4-5 Größenordnungen
- Bereitstellung von Strahlrohren an Wigglern und Undulatoren

Damit können zusätzlich zu den Experimentiermöglichkeiten von ROSY I neue Felder für die Grundlagenforschung in der Festkörperphysik, Chemie und Biologie erschlossen werden. Auch in der Materialforschung ist eine signifikante Erweiterung der Möglichkeiten abzusehen.

Für die Planung und den Bau eines solchen Speicherringes, die nicht unbedingt auf bekannte Techniken zurückgreifen können, sind Zeiträume von 6 - 8 Jahren zu veranschlagen. Gleichzeitig stehen jetzt die ersten Speicherringe dieser Leistungsklasse vor der Inbetriebnahme, so daß erste Betriebserfahrungen dort u. U. die Konzeption wesentlich beeinflussen können. Deshalb wird ROSY II als zweite Phase betrachtet, die zu einem späteren Zeitpunkt als ROSY I zur Bauentscheidung ansteht.

2.3. Einordnung des Projektes

Für die Diskussion eines neuen Projektes einer Synchrotronstrahlungsquelle sind neben dem regionalen Bedarf vor allen Maschinen und Projekte in anderen Institutionen zu betrachten. Dabei muß die Errichtungszeit solcher Anlagen beachtet werden, die zwischen 4 und 7 Jahren liegt. Eine Zusammenstellung der bekannten Synchrotronstrahlungsquellen bzw. der Projekte ist im Anhang B enthalten.

In Tabelle 2.2 sind zum Vergleich mit ROSY diejenigen Quellen in der Bundesrepublik Deutschland und Europa zusammengestellt, die unseres Erachtens in diesem Kontext von erheblicher Bedeutung sind.

Um einen schnellen Überblick zur Einordnung einzelner SR-Quellen zu erhalten, sind in Abb. 2.7 die Arbeitsbereiche der Quellen den Wellenlängen und Photonenenergien gegenübergestellt. Weiterhin eingetragen wurden die K_{α} -Wellenlängen der Elemente im betrachteten Energiebereich.

Tabelle 2.2: Ausgewählte Synchrotronstrahlungsquellen der 2. und 3. Generation
in der Bundesrepublik Deutschland und Europa

(Erklärung der Abkürzungen: E - Elektronenenergie im Speicherring; R - Radius der Ablenkmagneten;
 ϵ_x - Emittanz; $1/\lambda_c$ - charakteristische Wellenlänge; $1/E_c$ - charakteristische Energie der Strahlung /
 E_o ist die Photonenergie bei der der Photonenfluß ein Maximum durchläuft / N ist die Photonen-
ausbeute bei 100 mA und $\theta=10$ mrad)

Status	Ring	E [GeV]	R [m]	ϵ_x [π nmrad]	ϵ_N^* [π nmrad/ GeV ²]	E_c [keV]	λ_c [nm]	E_o [keV]	N 10^{13} phot./ s*mm ² *0,1 Δ W	Standort
a.	BESSY I	0,8	1,78	40,0	62,5	0,638	1,90	0,19		Berlin (D)
a.	ELSA	3,5	10,8	900	73,5	8,23	0,15	2,64		Bonn(D)
a.	DORIS	4,5	12,1	405	20	16,7	0,074	5,01	1,02	Hamburg(D)
b.	DELTA	1,5	3,3	9,9	4,4	2,27	0,55	0,68		Dortmund(D)
b.	Max II	1,5	3,33	8,6	3,8	2,24	0,55	0,68		Lund (S)
b.	ELETTRA	2,0	5,50	7,2	1,8	3,22	0,38	0,97		Triest(I)
b.	ESRF	6,0	24,96	6,2	0,17	19,2	0,065	5,76	66,2	Grenoble(F)
c.	DAPS	1,2	3,18	15	10,4	1,2	1,027	0,36		Daresbury (GB)
c.	BESSY II	1,7	4,20	6,2	2,14	2,6	0,48	0,78	178	Berlin(D)
c.	SLS	2,1	2,19	1,5	0,34	3,5	0,35	1,05		Zürich (CH)
c.	SOLEIL	2,15	4,48	17	3,68	4,92	0,27	1,64		Orsay (F)
c.	KfK-Quelle	2,4	4,90	700	121	6,26	0,2	1,88	3,4	Karlsruhe(D)
c.	LISA	2,5	5,60	20,0	3,2	6,19	0,2	1,86	83,5	Bonn(D)
c.	SLM	2,5	5,56	300	48,0	6,23	0,2	1,87	4,5	Mainz (D)
c.	ROSY I	3,0	7,15	40	4,44	8,38	0,15	2,51	41,9	Dresden (D)
c.	ROSY II	3,2	8,0	3,4	0,33	9,0	0,14	2,72	295	Dresden (D)

a: in Betrieb; b: im Bau und c: in der Planung / ϵ_N^* * normiert auf 1GeV

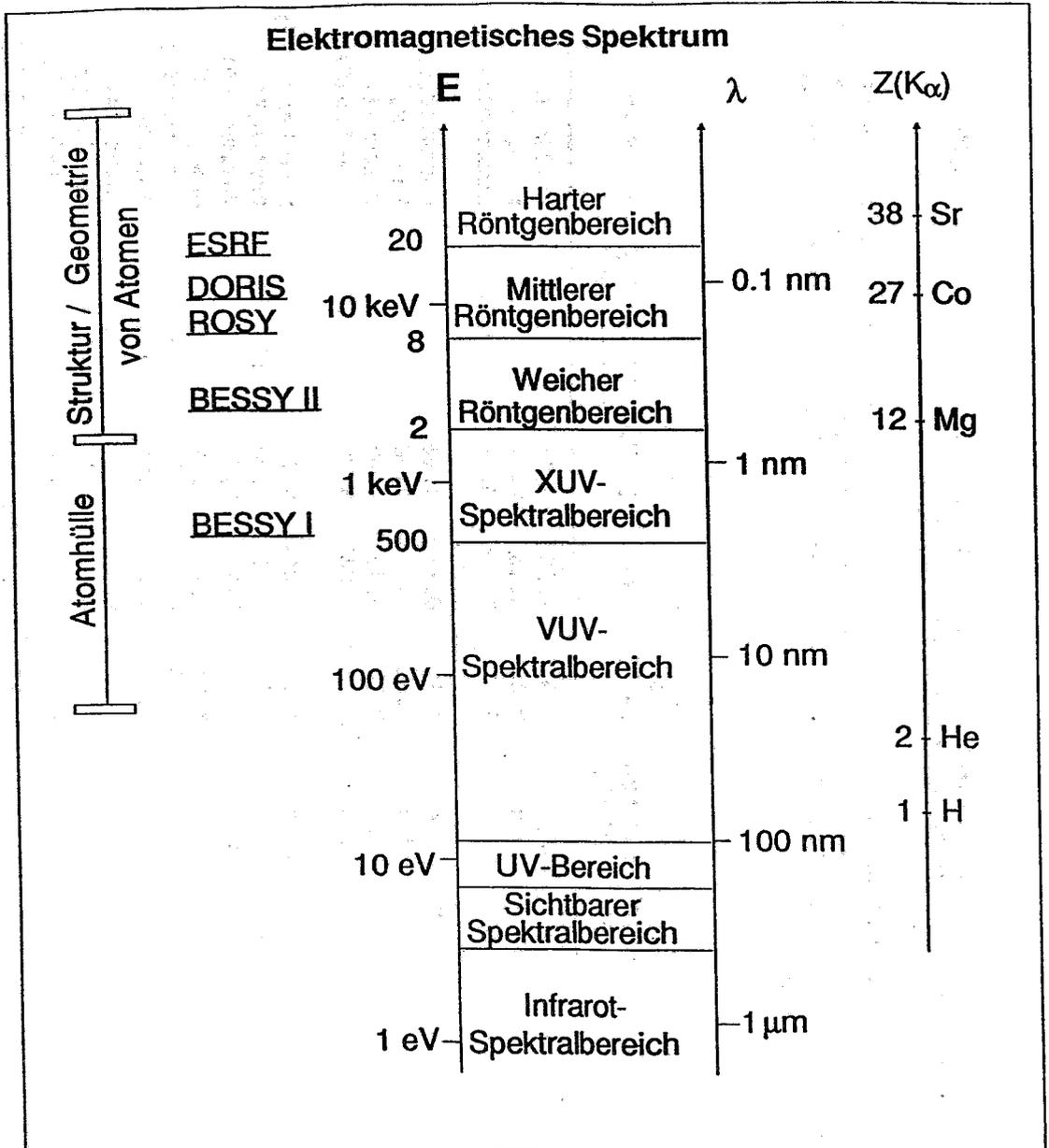


Abb. 2.7: Zuordnung der Arbeitsbereiche ausgewählter Synchrotronstrahlungsquellen zur Photonenenergie und Wellenlänge der Strahlung (λ und E). Anwendungsbereiche der Strahlung und Energien der charakteristischen K_{α} -Strahlung der Elemente sind zusätzlich eingetragen.

In Betrieb befinden sich die Anlagen ELSA, BESSY I und DORIS III. BESSY I ist eine Strahlungsquelle der 2. Generation. Bei der Energie von 0.8 GeV wird Strahlung im VUV-Bereich emittiert. Der Speicherring DORIS ist, wie ELSA auch, als ein Hochenergiebeschleuniger für kernphysikalische Experimente konzipiert worden und ist somit eigentlich eine Synchrotronstrahlungsquelle der 1. Generation. Mit der Erweiterung zu DORIS III, d. h. der Möglichkeit Undulatoren und Wiggler aufzubauen, kann DORIS auch als eine Quelle der 3. Generation angesehen werden. DORIS emittiert Strahlung im mittleren Röntgenbereich um $E_c = 10$ keV. Die Bedeutung dieses Spektralbereiches zeigt sich daran, daß die Anzahl der Experimentierplätze an DORIS ständig erhöht wurde.

Im Bau befinden sich die Speicherringe DELTA [19], MAX II [18], ELETTRA [14] und die ESRF [15]. Alle vier Maschinen sind Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation, d. h. die Emittanzen liegen zwischen $(6-10)\pi$ nmrad. Gegenwärtig ist mit SuperACO (Orsay) weltweit nur eine Maschine der 3. Generation in Betrieb (siehe Anhang B). Von MAX II und ELETTRA wird vorwiegend Strahlung im XUV-Bereich ($E_c = 2-3,5$ keV) emittiert. Mit der Fertigstellung dieser Ringe wird für diesen Spektralbereich eine erheblich Anzahl von Meßplätzen zur Verfügung stehen. Die ESRF ist ebenfalls eine Maschine der 3. Generation. Sie wird als 1. Quelle im harten Röntgenbereich ($E_c = 19$ keV) in etwa einem Jahr zur Verfügung stehen. Der Speicherring DELTA ist ein "Testspeicherring", dieser soll hauptsächlich für Studien der Maschinenphysik genutzt werden. Zusätzlich wird bei DELTA ein "Freie-Elektronen-Laser-Experiment" aufgebaut.

In der Planungsphase befinden sich die Speicherringe BESSY II, eine Synchrotronstrahlungsquelle am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK-Quelle) die Synchrotronlichtquelle Mainz (SLM), LISA in Bonn und die hier vorgeschlagene Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle ROSY mit den Ausbaustufen ROSY I und ROSY II sowie im europäischen Rahmen die Projekte DAPS [20], SLS [21] und SOLEIL [22].

BESSY II ($1,5 \text{ GeV} \leq E \leq 1,9 \text{ GeV}$) ist als XUV-Quelle der 3. Generation geplant [23]. Die emittierte Strahlung liegt in den Spektralbereichen von MAX II und ELETTRA. Auch die geplanten Projekte in Zürich und Lure II emittieren in diesem Spektralbereich. BESSY II wird vorwiegend von der Grundlagenforschung genutzt werden.

SLM [10], LISA [8] und die KfK-SR-Quelle [9] sollen Synchrotronstrahlung für die industrielle und angewandte Forschung sowie Anwendungen in der Mikrostrukturtechnik bereitstellen. Hierfür wird eine kritische Wellenlänge von $\lambda_c = 0.2\text{nm}$ gefordert und

somit liegt die Energie aller dieser Anlagen um 2.5 GeV. Während die KfK-SR-Quelle auf die Anforderungen der Mikrostrukturtechnik/Mikromechanik zugeschnitten ist, können an LISA auch Experimente aus der Grundlagenforschung durchgeführt werden, die eine kleine Emittanz benötigen. Geplant ist die Erstellung dieser Maschine durch die Industrie, wobei die Bauzeit nicht länger als 3 bis 4 Jahre betragen sollte.

Zum Vergleich der verschiedenen Synchrotronstrahlungsquellen sind in Abb. 2.8 Photonenflüsse dargestellt, die sich mit experimentellen Anordnungen an den Ablenkmagneten dieser Quellen erreichen lassen. (Die hier dargestellten Photonenflüsse entsprechen der Strahldichte in der Optik, d. h. es ist eine quellenbezogene Größe.) Vorausgesetzt wurde hierbei, daß in vertikaler Richtung die gesamte Strahlungskeule erfaßt wird und in horizontaler Richtung bei ROSY I ein Öffnungswinkel von $\theta = 10,0$ mrad zur Verfügung steht. Die Größe des Speicherringes wurde durch die Multiplikation des Photonenflusses mit R_0/R berücksichtigt (R_0 ist der mittlere Radius von ROSY I und R der der vergleichenden Maschine). Weitere Details zu diesem Vergleich finden sich in Teil II, Maschinenkonzept, Abschnitt 8.2.

Aufgrund der höheren Energie und der kleineren Emittanz ergibt sich für ROSY II ein höherer Photonenfluß als bei BESSY II. Bezüglich der spektralen Verteilung wird von ROSY II eine weitere Zehnerpotenz abgedeckt als bei BESSY II und somit ergänzen sich diese beiden Strahlungsquellen. Im Verhältnis zur DORIS wird in den Ablenkmagneten ein um mehr als 2 Größenordnungen höherer Photonenfluß erzeugt, entsprechend der Konzeption einer Quelle der 3. Generation.

ROSY I ist zu vergleichen mit den Projekten KfK, SLM, LISA und DORIS. ROSY I erzeugt Photonenflüsse, die im Gegensatz zur KfK-Quelle und zu SLM um gut eine Zehnerpotenz höher liegen (entsprechend der kleineren Emittanz von ROSY I). Wegen der noch kleineren Emittanz des Speicherringes LISA sind die Photonenflüsse an dieser Quelle um den Faktor 5 größer als bei ROSY I.

Wegen der höheren Energie deckt ROSY I von diesen Maschinen den größeren Spektralbereich ab. Mit ROSY I wird aufgrund des kleineren Umfanges und der kleineren Emittanz ein Spektrum abgedeckt, das dem von DORIS entspricht. In einem weiteren Spektralbereich liegt die Photonenausbeute wegen der kleineren Emittanz und des kleineren Abstandes R jedoch um den Faktor 40 höher als bei DORIS.

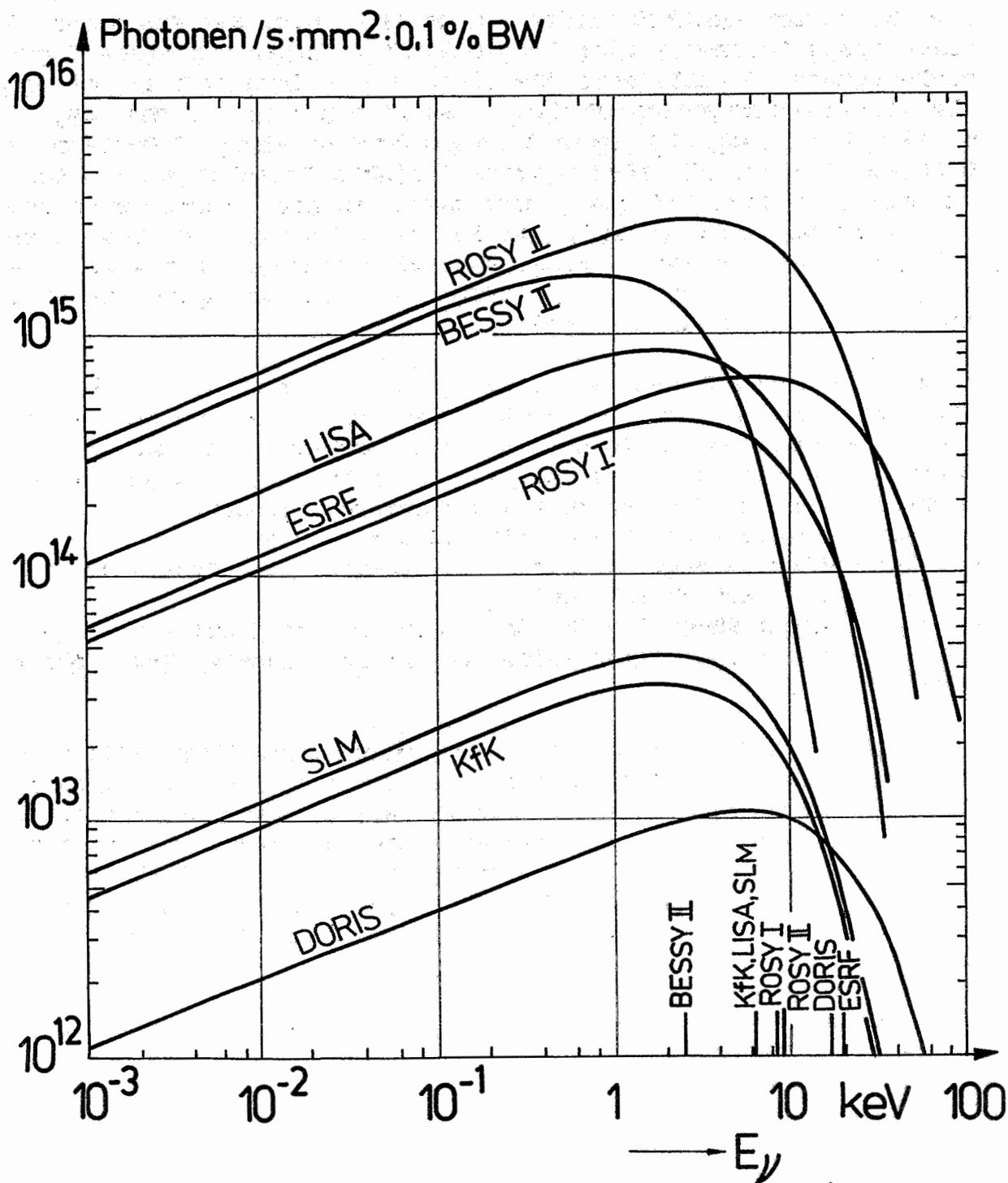


Abb. 2.8: Vergleich der spektralen Photonenausbeute aus den Ablenkmagneten für verschiedene Synchrotronstrahlungsquellen

Dies sind jedoch theoretische Betrachtungen, die für einen Stron $I = 100 \text{ mA}$ durchgeführt wurden. In Realität wird der Photonenfluß durch viele Parameter wie: Instabilität, Einführung eines Feed-back-Systems, installierte HF-Leistung usw. bestimmt und die in Abb. 2.8 wiedergegebenen Verhältnisse können sich verschieben. Tabelle 2.2 zeigt, daß derzeit in Deutschland drei SR-Quellen in Betrieb sind und für fünf weitere Projekte Vorschläge in unterschiedlicher Detaillierung existieren. An der europäischen SR-Quelle in Grenoble (ESRF), die in einem Jahr in Betrieb gehen soll, ist Deutschland zu einem Viertel beteiligt. Für Vorbereitungen von Experimenten an der ESRF ist die Verfügbarkeit über eine nationale Quelle notwendig.

Im europäischen Rahmen kann festgestellt werden, daß in den nächsten 3 bis 4 Jahren in Nord-, Süd- und Westeuropa SR-Quellen der 3. Generation im XUV-Bereich zur Verfügung stehen werden. Weiterhin wird sich in Westeuropa mit der ESRF eine SR-Quelle der 3. Generation für den harten Röntgenbereich befinden.

Eine gewisse Lücke in diesem Bild zeigt sich, daß

- keine nationale SR-Quelle der 3. Generation den Röntgenbereich von 2 bis 20 keV abdeckt und
- keine moderne SR-Quelle für das Einzugsgebiet Mittel- und Osteuropa in absehbarer Zeit, d.h. in den nächsten 3-4 Jahren vorhanden ist.

Mit etwa 3 GeV Elektronenenergie im Speicherring liegt ROSY zwischen den von BESSY II und der ESRF abgedeckten Energiebereichen. Eine Synchrotronstrahlungsquelle mit einer charakteristischen Wellenlänge von 0,14 nm ist den Problemen der Materialforschung in der Region gut angepaßt. Die überregionale Attraktivität einer solchen Quelle ergibt sich bei den geplanten Strahlqualitäten auch aus ihrer ergänzenden Position bezüglich der beiden o.g. Projekte.

Die Bedeutung des Spektralbereiches von 2 bis 20 keV zeigt sich auch an der starken und wachsenden Nachfrage nach Meßzeit am Speicherring DORIS.

3. Standort Rossendorf

Das Forschungszentrum Rossendorf bietet mit seiner Infrastruktur, seinem Territorium und der Erfahrung seiner Mitarbeiter beste Voraussetzungen für den Aufbau und den Betrieb eines Großgerätes, dessen Anforderungen an die Infrastruktur die Möglichkeiten von Universitätsinstituten weit übersteigen. Rossendorf kann Funktionen wahrnehmen, die von keinem anderen Institut in der Region zu übernehmen sind. Mit der Verwirklichung von ROSY I könnte vielen anderen Forschungseinrichtungen ein modernes Großgerät zur Verfügung gestellt werden, das eine einzelne Institution nicht auslasten kann. In dieser Hinsicht kann Rossendorf auch auf Erfahrungen aus dem Betrieb der Beschleuniger, des Reaktors oder der kernchemischen Laboratorien zurückgreifen.

Der Aufbau und Betrieb von Großgeräten wird auch in Zukunft ein wesentliches Element moderner Forschungszentren sein. Gleichzeitig sollte aber die Multidisziplinarität des Aufgabenspektrums von Rossendorf berücksichtigt werden. Die potentielle Nutzung einer Synchrotronstrahlungsquelle durch andere Arbeitsrichtungen als die Materialforschung, naheliegend sind vor allem die Kernphysik und die Biomedizin, ist hier zu befördern. Erste Gedanken zu einer solchen Nutzung wurden bereits unter 1.5. dargelegt.

Nach außen hin wird das Strahlencentrum Rossendorf mit einer Synchrotronstrahlungsquelle ein konstitutives Element des Materialforschungsverbundes Dresden darstellen. Dieser Forschungsverbund ist in der Bildungsphase und wird bis Ende 1992, wenn die Neustrukturierung der Hochschulen in Sachsen in wesentlichen Teilen erfolgt ist, klar umrissen sein. Wesentliches Ziel ist die Abstimmung und Kooperation in den Forschungsaufgaben der in Dresden mit der Materialforschung befaßten Institutionen (vgl. Abschn. 1.1.).

Ein hochwertiges Forschungsgroßgerät wie eine SR-Quelle muß überwiegend als Nutzermaschine konzipiert sein. Wie bereits im Abschnitt 1.4. ausgeführt, sollte es eine feste Betriebsmannschaft im FZR geben. Die wissenschaftlich-technische Betreuung der Experimentieranlagen obliegt einer Gruppe, die aus Mitarbeitern des FZR und der lokalen Forschungseinrichtungen besteht. Der andere Teil der Nutzer sind externe "Gäste".

Für einen derartigen Betrieb liegen in Rossendorf schon entsprechende Erfahrungen und eine infrastrukturelle Basis vor, so daß darauf bereits in der Projektphase zurückgegriffen werden kann.

3.1. Wissenschaftlich-technische Voraussetzungen für ROSY im Forschungszentrum Rossendorf

Das FZR verfügt über einen ausgiebigen Erfahrungsschatz mit entsprechendem know-how aus mehr als 30jähriger Forschungsarbeit im ehemaligen Zentralinstitut für Kernforschung (gegründet 1956). Die Mitarbeiter haben diese langjährigen Erfahrungen in das neugegründeten Forschungszentrum eingebracht. Bisherige Arbeiten, die beschleunigerrelevant sind oder den Umgang mit Strahlungstechniken implizieren:

- Betrieb und Weiterentwicklung von Ionenbeschleunigern (Zyklotron, Tandem, Van de Graaff, Implanter)
- Betrieb und Rekonstruktion des Forschungsreaktors
- Aufbau von Nullreaktoren
- Entwicklung von Ionenquellen
- Entwicklung von Bestrahlungseinrichtungen für Experimente der Kern- und Festkörperforschung sowie für Isotopenproduktion, Analytik und therapeutische Zwecke
- Technologie zum Entwurf und Bau von Magnetsystemen
- Entwicklung und Aufbau von Stromversorgungsanlagen
- Automatisierung von Betriebsführungsprozessen (Leittechnik) an den Beschleunigern und Reaktoren
- Experimentautomatisierung unter Echtzeitbedingung
- Entwicklung elektronischer Meß- und Steuerungseinrichtungen
- Entwicklung und Fertigung von Vakuumsystemen einschließlich UHV-Qualität
- Konstruktion und Fertigung mechanischer Baugruppen bis hin zur Feinwerktechnik und Optik.

Die aufgeführten Erfahrungen in Rossendorf sind zwar nicht auf dem speziellen Gebiet der Synchrotronstrahlungsquellen gesammelt worden, stellen jedoch eine solide Wissensbasis für die neue Art der Aufgabenstellung eines Elektronenbeschleunigers bzw. Speicherringes dar.

Im Forschungszentrum sollten auch Prototypen der verschiedenen Speicherringkomponenten und Experimentausrüstungen erstellt werden. Die Anfertigung von Ausrüstungsgegenständen in größeren Stückzahlen sind sicherlich vorzugsweise industriellen Herstellern zu übertragen.

3.3. Technische Voraussetzungen

Es sind alle Möglichkeiten zur Aufnahme einer Synchrotronstrahlungsquelle vorhanden, da das Gelände des Forschungszentrums noch über große unbebaute Flächen verfügt. Die verkehrstechnische Einbindung des Standortes Rossendorf ist für so ein Projekt günstig. Rossendorf liegt etwa 15 km Luftlinie vom Stadtzentrum Dresdens entfernt. Der Boden besteht im wesentlichen aus Sanden und Kiäsen, die für die Aufnahme größerer Bauwerke geeignet sind. Das mittel- und ostsächsische Gebiet ist nicht erdbebengefährdet. Die technischen Aspekte des Standortvorschlages sind im Anhang C im Detail dargestellt.

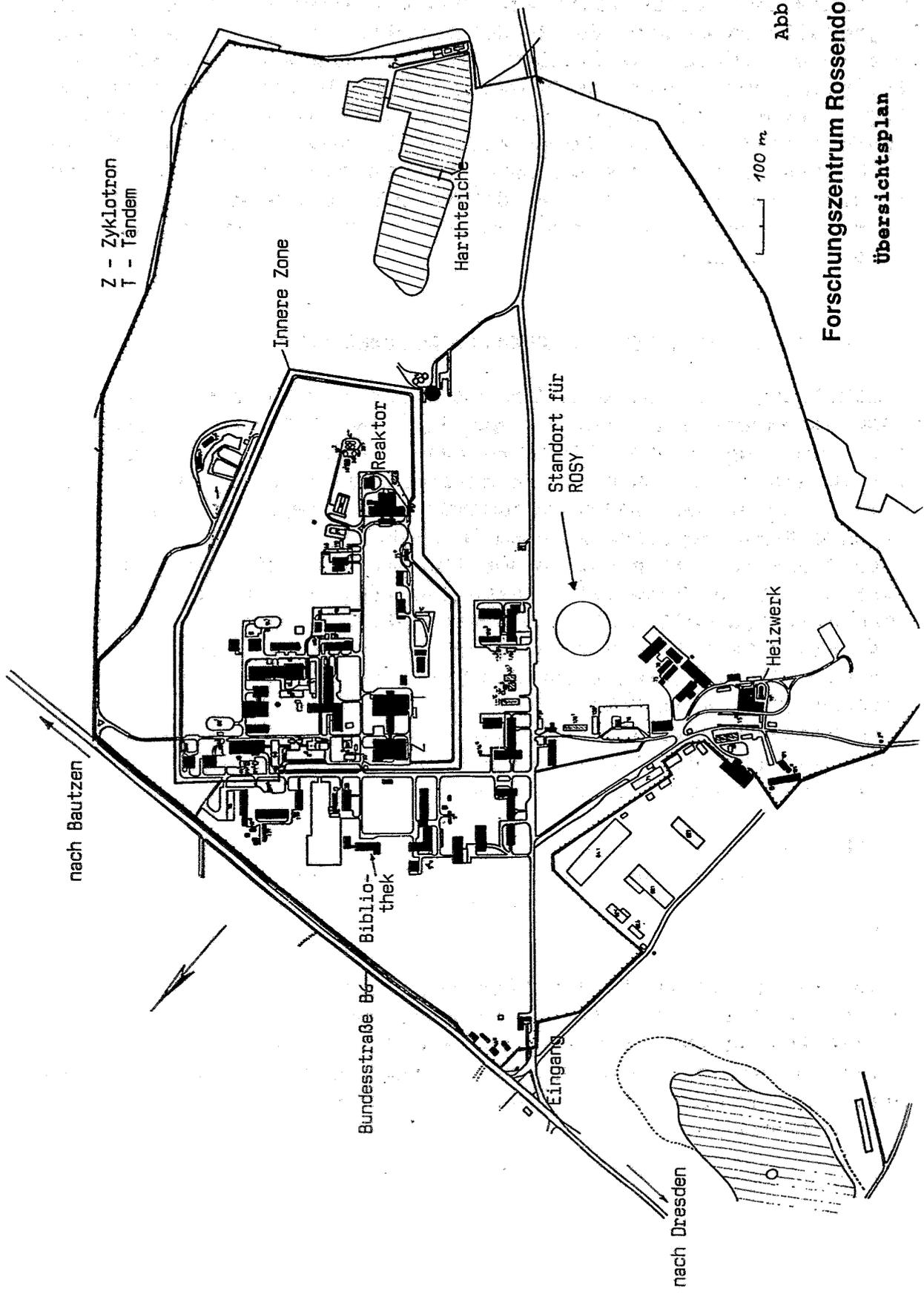
3.4. Platz für die Synchrotronstrahlungsquelle

In Abbildung 3.3. ist eine Übersichtskarte des Geländes des Forschungsstandortes Rossendorf gezeigt. Der extra gesicherte Bereich der sogenannten "inneren Zone" enthält alle Gebäude und Einrichtungen, in denen mit Kernmaterial gearbeitet wird. Für die Auswahl eines geeigneten Standortes der SR-Quelle ROSY wurden folgende Gesichtspunkte zugrunde gelegt:

- Der Standort soll nicht in der inneren Zone sein (keine Arbeit mit spaltbarem Material, starke Nutzung durch Gäste).
- Der Standort soll sich an die vorhandene Bebauung anschließen, um einer "Zersiedelung" des Territoriums vorzubeugen und die Kosten für die Erweiterung des Versorgungs- und Kommunikationsnetzes günstig gestalten.
- Der Standort soll nicht in unmittelbarer Nachbarschaft der Bundesstraße (B6) liegen, um ständige Erschütterungen durch den fließenden Verkehr zu reduzieren.

Als Standort wird daher ein Platz südwestlich der internen Straße nach Dittersbach, gegenüber den Gebäuden der IfE-Außenstelle, vorgesehen. Im Plan wurde dies durch den großen Kreis dokumentiert.

Dieser Platz außerhalb der "inneren Zone" gehört dann zum frei zugänglichen Teil des Forschungszentrums. Eine solche Ortswahl ist geboten durch die große Zahl von Nutzern einer Synchrotronstrahlungsquelle. Das Sicherheitsregime in Rossendorf würde dem Zugang auswärtiger Nutzer (einschließlich Ausländer) keine besonderen Forderungen.



100 m

Abb. 3.1

**Forschungszentrum Rossendorf
Übersichtsplan**

4. Einfluß auf die Region

4.1. Kooperation mit wissenschaftlichen Einrichtungen

Für eine lokale Nutzergemeinschaft einer Synchrotronstrahlungsquelle gibt es eine breite Interessenbasis. Letztere ist auch ein wesentliches Argument für ROSY I am Standort Rossendorf und im Abschnitt 1. ausführlich dargestellt worden. Das Konzept der Errichtung und des Betriebes von ROSY I zielt auf eine umfassende Kooperation mit diesen Forschungseinrichtungen.

Durch den in der Vergangenheit weitestgehend behinderten Zugang der Wissenschaftler aus den neuen Bundesländern zu Synchrotronstrahlungsquellen der Kreis der Wissenschaftler mit aktiven Erfahrungen in der Nutzung solcher Strahlung im Moment quantitativ noch nicht mit dem in den alten Bundesländern vergleichbar. Ein starkes Wachstum des Nutzerkreises deutet sich jedoch an, da für die neue Förderperiode ab 1992 eine große Zahl von Vorschlägen aus Ostdeutschland für Experimente an DORIS III und BESSY eingereicht wurde. Davon sind 12 Gruppen in die BMFT-Förderung aufgenommen worden. Bereits aktive Anwender gibt es in Sachsen an den Universitäten Dresden (Physik), Freiberg (Werkstoffwissenschaften), Leipzig (Physik, Kristallographie) und in den ehemaligen Akademieinstituten in Dresden (ZFW, ITP) und Leipzig (ZfI).

Die Existenz eines solchen leistungsfähigen Forschungsinstrumentes wird erfahrungsgemäß in relativ kurzer Zeit die Nachfrage nach Meßzeit durch neue Gruppierungen erhöhen. Damit gibt es auch einen Impuls für die Entwicklung neuer Forschungsprofile, die wesentlich durch die hochwertigen Experimentiermöglichkeiten bestimmt sein werden.

Eine starke wissenschaftliche Ausstrahlung in die Nachbarländer CSFR und Polen wird erwartet, da auch das Forschungsprofil in diesen Regionen unmittelbarer Nachbarschaft zu Sachsen von der Materialforschung stark mitbestimmt wird (siehe 1.2.). Deshalb erscheint es sinnvoll bei Konzeption und Aufbau einer Synchrotronstrahlungsquelle bereits Wissenschaftler interessierter Einrichtungen aus den Nachbarländern in die entsprechenden Gruppen in Rossendorf zu integrieren. Gleichzeitig ist zu prüfen inwieweit die zukünftige Nutzung des Strahlenforschungszentrums Rossendorf durch Gruppen der Nachbarländer die Nutzung anderer Einrichtungen dieser Länder (z.B. Neutronenstrahlen) im Austausch durch deutsche Gruppen ermöglichen kann.

4.2. Einfluß auf die regionale Industrie

Projektierung, Aufbau, Nutzung und Weiterentwicklung eines Forschungsgrößgerätes, wie es eine moderne Synchrotronstrahlungsquelle ist, stellt auch stets eine Herausforderung an das *industrielle Umfeld* und das ingenieurtechnische Niveau in der Region des Standortes dar. Errichtung und Betrieb einer Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation sind nur möglich durch Einsatz und Beherrschung modernster Technologien und Materialparameter (z. B. Ultrahochvakuumtechnik, HF- und spezielle Elektrotechnik, Präzisionsmechanik, Hochleistungs- und Präzisionsoptik einschließlich ihrer Spezialmaterialien, ein breites Spektrum des wissenschaftlichen Gerätebaus). In Sachsen sind traditionsreiche Unternehmen des Maschinenbaus, der Feinwerktechnik, der Elektrotechnik und Elektronik sowie der Optik ansässig. Der Aufbau einer Synchrotronstrahlungsquelle in Rossendorf könnte gerade für diese Industriebereiche Sachsens außerordentlich stimulierend wirken. Um Möglichkeiten für die Fertigung der Beschleunigerkomponenten in sächsischen Raum zu erkunden, wurden zunächst Recherchen bei Firmen mit Niederlassungen in Dresden durchgeführt. Dabei ergab sich:

* **Siemens Energie- und Medizintechnik GmbH Dresden** hat einen Teil des ehemaligen Transformatoren- und Röntgenwerks (TUR) übernommen.

Als Tochter der Siemens Anlagentechnik GmbH Erlangen werden derzeit Aufgaben innerhalb der Projekte ESRF, DESY, NET und ITER bearbeitet. Es besteht Interesse und auch die Voraussetzung für die Übernahme der Aufgaben:

- Magnete, zugehörige Stromversorgungen (auch gepulst),
- komplette Energieeinspeisung für ROSY,
- Hochspannungsnetzgeräte (z.B. Klystronversorgung für cavities)

* **GLATT- Systemtechnik und PTD Präzisionsmechanik Dresden GmbH**
(vormals Hochvakuum Dresden, HVD)

Beide Firmen arbeiten als Tochtergesellschaften der GLATT GmbH geschäftlich sehr eng zusammen. Sie vertreten außerdem die Firmen ALCATEL und FISIONS, die Vakuumkomponenten herstellen. Sie sind auf den Gebieten Feinwerk- und Hochvakuumtechnik tätig und an der Herstellung des UHV-Kammersystems für ROSY sehr interessiert. UHV Pumpen sind nicht im Sortiment. Diese können jedoch vermittelt werden.

*** LEYBOLD AG, Niederlassung Dresden**

Als Tochter der Leybold AG Köln werden relevante Aufgaben mit hoher Sachkenntnis bearbeitet. Es bestehen Voraussetzungen und Interesse für folgende Aufgaben:

- UHV-Standardkomponenten, UHV-Pumpsysteme mit integrierter Elektronik und zugehöriger Meßtechnik,
- Ausheizsystem komplett.

* Die **Dresdner Industrie- und Handelskammer** ist in der Lage, Angaben über fachspezifische mittelständische und kleinere Betriebe zu liefern. Tests ergaben, daß mittelständische und kleinere Unternehmen durchweg Aufgeschlossenheit und Interesse zeigten. Die Fachgebiete Feinwerktechnik, Lufttechnik, HF-Meßtechnik, Entwicklung und Kleinserienfertigung elektronischer Baugruppen, Herstellung und Konfektionierung von Kabeln sind z.B. im Dresdner Umfeld ohne Schwierigkeiten realisierbar.

Literatur I

- [1] Deutsche Einheit in Forschung und Technologie, Hrgb. BMFT, Bonn, Nov. 1991, S. 47
- [2] A. Kisiel (Krakow), persönliche Mitteilung
- [3] Synchrotron Radiation News, vol. 4, No. 3, 1991
- [4] J. Hrdy, persönliche Mitteilung
- [5] M.B. Lewis, W.R. Allen, R.A. Buhl, N.H. Packan, S.W. Cook, L.K. Mansur, Nucl. Instr. Meth. B43 (1989) 243-253
- [6] JAERI ART Newsletter No. 2, March 1990, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
- [7] A. Taylor, C.W. Allen, E.A. Ryan
Nucl. Instr. Meth. B24/25 (1987) 598-602
- [8] Vorschlag für den Bau eines Speicherringes zur industriellen Nutzung der Synchrotronstrahlung im Raum Bonn, Bonn, Oktober 1991
- [9] Vorschlag für eine dedizierte Synchrotronstrahlungsquelle für die Mikrosystemtechnik im Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, November 1991
- [10] Vorschlag für den Bau einer Synchrotron-Lichtquelle in Mainz;
1. Teil: Technische Auslegung, Mainz, Juni 1991
- [11] Y. Kamiya and M. Kihara; KEK-Report 83-16 (1983)
- [12] L.C. Teng; ANL/FNAL-Report LS-17 (1985)
- [13] M. Sands, Physics of Electron Storage Rings
SLAC-121 (1970)
- [14] ELETTRA Conceptual Design Report, Sincrotrone Trieste, April 1989,
und Synchrotron Radiation News 4 (1991) 22 - 27
- [15] ESRF - Foundation Phase Report, Grenoble 1987
- [16] The Advanced Light Source: Technical Design, LBL, PUB-5111, July 1986
- [17] A. Wrulich; Workshop on the 4th Generation Light Sources, Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, 1992
- [18] M. Erikson, Synchrotron Radiation News, 3 (1990)14
- [19] DELTA a Status Report, Delta Group, University of Dortmund, Institute of Physics, August 1990

- [20] J.A. Clarke, J.N. Corlett, M.W. Poole, S.L. Smith,
V.P. Suller, L.A. Welbourne
Accelerator Physics Aspects of the Daresbury Advanced
Photon Source, SERC, Daresbury Laboratory, 1992
- [21] R. Abela, W. Joho, P. Marchard, S.V. Milton, L.Z. Rivkin
Design Considerations for a Swiss Light Source (SLS),
EPAC 92, Berlin, 24-28 March
- [22] SOLEIL - Source Optimisee de Lumiere d'Energie Interédiaire
de LURE / Avant-Projet
Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement
Electromagnétique, Centre Universitaire Paris-Sud, Orsay
- [23] BESSY II - Eine optimierte Undulator/Wiggler-Speicherring-
Lichtquelle für den VUV- und XUV-Spektralbereich, Berlin
1986; Teil 2: Technische Studie,
BESSY II in Adlershof, Berlin, März 1991
- [24] P. Bley, J. Göllert, M. Harmening, H. Himmelhans, W. Menz,
C. Müller, U. Wallrabe
The LIGA Process for the Fabrication of Micromechanical and
Microoptical Components
Microsystems Technologies 91, Berlin 1991
- [25] D. Einfeld, M. Plesko, A modified QBA optics for low
emittance storage rings, Workshop on the 4th generation
sources, Stanford, 24-27 Feb. 1992
- [26] G. Wüstefeld, priv. Mitteilung

Für die Ausarbeitung des Teils I der Projektstudie wurden Beiträge von folgenden Kollegen verwendet:

W. Blau	TU Dresden
H. Büttig	FZR
D. Einfeld	FHO / FZR
H. Guratzsch	FZR
W. Hoyer	TU Chemnitz
J. Hrdy	Prag
D. Jähnichen	IPF Dresden
D. Jannsen	FZR
A. Kisiel	Krakow
N. Mattern	IFW Dresden
W. Matz	FZR
H. Prade	FZR
H. Spies	FZR
E. Wieser	FZR
E. Zschech	BAF

Das FZR dankt den Herren Haensel (Grenoble), Schülke (Dortmund), Hrdy (Prag), Kisiel (Krakow), Paufler und Pompe (Dresden) für ihre kritischen Hinweise zur Gestaltung des Projektvorschlages.

Forschungseinrichtungen der Materialforschung in Sachsen

1. Hochschulen

Bei den Hochschulen sind im wesentlichen nur die Arbeitsrichtungen genannt, die eine Beziehung zur Materialforschung oder auch zur Nutzung der Synchrotronstrahlung im engeren Sinne haben. Durch die gegenwärtig laufenden Neuberufungen für alle Lehrstühle können Änderungen eintreten.

1.1. Technische Universität Dresden

Fachabteilung Physik

An der Fachabteilung Physik der TU Dresden wird an vier Instituten experimentelle Festkörperphysik betrieben: Institut für Angewandte Photophysik, Institut für Experimentalphysik, Institut für Tieftemperaturphysik und Institut für Werkstoffphysik. Eine Aufzählung der untersuchten Phänomene und Substanzgruppen zeigt, daß die Forschung an diesen Instituten in der Tendenz mehr substanzbezogen ist als auf grundsätzliche Effekte gerichtet, strukturell vielfältige Materialien und die Realstruktur sowie strukturverändernde Prozesse mehr im Vordergrund stehen als Idealkristalle.

Untersuchte Phänomene sind: Plastische Verformung, Phasenumwandlungen bei hohen und tiefen Temperaturen, Festkörperreaktionen, epitaktisches Wachstum, Festkörperreaktionen in Dünnschichtsystemen, Elementarprozesse der Korrosion, Einwirkung von Ionenstrahlen und Licht, Textur. Substanzgruppen sind: photovoltaische Schichten, Legierungen, intermetallische Phasen, amorphe und nanokristalline Materialien, Dünnschichtsysteme, oxidische Supraleiter und Ferroelektrika. Dieses auf dem Überlappungsfeld zwischen physikalischer Grundlagenforschung und Materialforschung einzuordnende Profil ist im Verlauf von etwa drei Jahrzehnten gewachsen, wobei die Kooperation mit dem Umfeld, insbesondere mit dem Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung, eine Rolle spielte.

Eine Forschung, die auf strukturelle Vielfalt und strukturverändernde Prozesse ausgerichtet ist, benötigt naturgemäß ein großes Spektrum von Strukturuntersuchungsmethoden. Röntgen- und Elektronenstrahlverfahren einschließlich abbildender Techniken stehen traditionell im Mittelpunkt. Es wird Wert darauf gelegt, die Volumenstruktur oder die Struktur vergrabener Grenzflächen frei

von Artefakten der Präparation zu untersuchen. Deshalb sind mit harter Strahlung arbeitende Röntgenmethoden besonders wichtig.

Synchrotronstrahlungsexperimente werden seit 1981 durchgeführt. Begonnen wurde mit EXAFS und Reflektrometrie. Z.Z. läuft am HASYLAB ein Kategorie III-Projekt. Abgeleitet aus den z.Z. mit Labor-Röntgenanlagen bearbeiteten Projekten bestünde weiterhin Interesse an folgenden Synchrotronstrahlungsmethoden:

- Röntgenweitwinkelstreuung mit sehr harter Strahlung
- in-situ Hochtemperatur-Diffraktometrie.

Fachabteilung Chemie

Der Forschungsschwerpunkt des Instituts für Anorganische Chemie ist die Darstellung oxidischer Materialien durch Fällungsprozesse oder Festkörperreaktionen. Strukturuntersuchungen werden teils in einem eigenen Röntgenlabor, teils in Kooperation mit dem Institut für Experimentalphysik durchgeführt. Ein Projektvorschlag zur Untersuchung von Reaktionsprodukten aus Fällungsprozessen mit EXAFS am HASYLAB wurde vom Projektträger aus Kapazitätsgründen abgelehnt. Weiterhin würde Interesse an der in-situ-Untersuchung von Prozessen der anorganischen Chemie mittels Synchrotronstrahlung bestehen.

Das Institut für Physikalische Chemie beschäftigt sich mit der Darstellung von Materialien für elektrochemische Zellen von Katalysatoren. Es besitzt ebenfalls eine Röntgendiffraktometrie-Apparatur.

Institut für Werkstoffwissenschaft

Das Institut für Werkstoffwissenschaft beschäftigt sich u.a. mit Sinterprozessen bei Legierungen und mit metallischen Verbundwerkstoffen und besitzt ein eigenes Röntgendiffraktometrie-Labor.

Daß die Röntgendiffraktometrie für die Materialforschung an der TU Dresden eine wichtige Methode darstellt, wird schon daran sichtbar, daß für 1992 von vier Instituten Anträge zur Beschaffung neuer Diffraktometer über das Hochschulbauförderungsgesetz vorliegen.

1.2. Technische Universität Chemnitz

Die Material- und Werkstoffforschung gehört an der TU Chemnitz zu den tragenden und profilbestimmenden Elementen der Forschung. Neben technologisch bzw. für die unmittelbare Anwendung interessanten Fragestellungen, die sich u. a. an den Interessen der im Großraum Chemnitz ansässigen und sich entwickelnden Industrien orientieren, werden grundlagenbezogene Forschungen zunehmend an Gewicht gewinnen. Dabei ist die Entwicklung gekennzeichnet von der gegenseitigen Beeinflussung physikalischer, chemischer und material-wissenschaftlicher Aufgabenstellungen. Folgende Forschungsrichtungen werden nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand kurz- und mittelfristig dominieren:

- Dünnschichtforschung
- Flüssige Metalle und Legierungen/Phasenübergänge
- Verbundwerkstoffe

Fachbereich Physik

Die Dünnschichtforschung stellt traditionell den größten Anteil des Forschungspotentials im Fachgebiet Physik.

Es haben sich auf diesem Gebiet beachtliche Kapazitäten sowohl für die Präparation (Herstellung, Modifizierung) als auch für die Charakterisierung (Struktur und Bindung, elektrische, magnetische, optische, mechanische und andere Eigenschaften) herausgebildet. Neben ein- und polykristallinen Schichtsystemen (Metallsilizide, Kompositschichten, organische Schichten, Hartstoffschichten, HTSL-Schichten) werden amorphe bzw. nanokristalline Schichten (α -Si:H, α -C:H u. a.) hergestellt und auf ihre Funktionalität untersucht. Zunehmende Beachtung findet das Studium der Physik des Schichtbildungsprozesses, wobei insbesondere ionengestützte Abscheidungsverfahren mit dem Ziel der Herstellung definierter Mikrogefüge untersucht werden.

Die Forschungsarbeit an flüssigen Metallen und Legierungen ist gekennzeichnet durch die Strukturbestimmung mit Beugungsmethoden (Röntgen- und Neutronenbeugung) und die Messung von Eigenschaften (elektrische, magnetische, mechanische).

Ziel der Arbeiten sind das grundlagenphysikalische Verständnis des kondensierten Zustandes mit den beiden Zustandsformen fest und flüssig sowie die Bereitstellung von Stoffdaten für technologische Forschungen bzw. die industrielle Praxis (monotektische Legierungen, Viskosität, Grenzflächenspannungen). Die experimentellen Arbeiten werden von theoretischen Forschungen zur Physik nichtkristalliner kondensierter Stoffe (Molekulardynamik) begleitet. Die Untersuchung von Phasenübergängen (flüssig-flüssig, flüssig-fest) bildet einen Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten.

Neben der Nutzung der in Chemnitz aufgebauten Röntgenanlagen

sowie der Ausführung von Neutronenstreuexperimenten besteht dringender Bedarf an Experimenten mit Synchrotronstrahlung. Für die Untersuchung von nichtkristallinen Materialien ist dabei die Verwendung möglichst harter Strahlung erforderlich.

Fachbereich Werkstoffe

Im Fachbereich Werkstoffe werden Forschungsarbeiten zu folgenden Schwerpunkten durchgeführt:

- Werkstoffentwicklung: faserverstärkte Metalle und Keramiken, metallische und nichtmetallische Hochtemperaturwerkstoffe, Funktionswerkstoffe insbesondere für elektrische und elektronische Beanspruchung;
- Werkstoffveredlung: Wärmebehandlung insbesondere von Eisenwerkstoffen und Leichtmetallen, Dick- und Dünnschichttechnik für den Korrosions- und Verschleißschutz und spezielle Funktionsschichten;
- Werkstoffbe- und -verarbeitung: werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen an metallischen Werkstoffen beim Umformen, Trennen und Fügen.

Zu allen diesen sehr anwendungsorientierten Problemen ist eine Untersuchung an einkristallinen oder polykristallinen Modellsystemen unbedingt erforderlich, wobei neben Metall/Metall- vor allem Metall/Keramik-Grenzflächen vorrangig untersucht werden.

Dabei stehen die folgenden Untersuchungsaufgaben im Vordergrund:

- Elementanalyse an inneren Grenzflächen und Korngrenzen
- Morphologie und Grobstruktur an faserverstärkten und mehrphasigen Schichtsystemen
- Phasenanalyse dünner Schichten und an Grenzflächen einschließlich der Ermittlung innerer Spannungen und bei höheren Temperaturen sowie möglichst zeitaufgelöst in Abhängigkeit von der Temperatur und realen Beschichtungsbedingungen.

1.3. Bergakademie Freiberg

Die Forschung auf dem Gebiet der Werkstoffwissenschaften ist an der Bergakademie Freiberg nach Werkstoffgruppen gegliedert und umfaßt die gesamte Werkstoffpalette:

- Metallische Werkstoffe (Fe- und Ne-Metalle)
- Keramische Hochleistungswerkstoffe
- Halbleiterwerkstoffe
- Glas- und Silikatwerkstoffe
- Verbundwerkstoffe
- Polymere (geplant)

2. Institute der "Blauen Liste"

2.1. Forschungszentrum Rossendorf

(445 Mitarbeiter)

Das Forschungszentrum Rossendorf gliedert sich in die 5 wissenschaftlichen Institute für

- Ionenstrahlphysik und Materialforschung
- Kern- und Hadronenphysik
- Radiochemie
- bioanorganische und radiopharmazeutische Chemie
- Sicherheitsforschung

Die im Kontext mit einer Synchrotronstrahlungsquelle interessante Materialforschung ist im ersten Institut konzentriert. Im Institut für Sicherheitsforschung gibt es auch eine materialorientierte Abteilung, die sich mit der Neutronenversprödung von Reaktor-druckbehälterstahl befaßt. Hier könnte es in Zukunft Nutzungsinteressen für die Synchrotronstrahlung geben, falls diese Arbeitsrichtung nach Fertigstellung einer solchen Quelle noch neue Aufgabenstellungen erschließt. Das Arbeitsprogramm des Institutes für Ionenstrahlphysik und Materialforschung ist nachfolgend in Kurzfassung dargestellt und zeigt, daß es sich um einen wesentlichen Nutzer einer Synchrotronstrahlungsquelle handeln wird:

Im Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung werden die beiden traditionellen Hauptlinien der Nutzung von Ionenstrahlen zur Modifizierung von Festkörperoberflächen und oberflächennahen Schichten, einschließlich theoretischer Arbeiten, die eng mit den experimentellen Zielen verknüpft sind, sowie von Ionen- und Neutronenstrahlung zur Analytik kondensierter Materie fortgeführt.

*** Ionenstrahlgestützte Materialmodifikation**

Das Arbeitsprogramm auf dem Gebiet der ionenstrahlgestützten Materialmodifikation gliedert sich in 3 experimentelle Richtungen und eine theoretische Gruppe, die alle 3 Richtungen unterstützt.

Modifizierung von Halbleitern und Mikrostrukturierung

Ziel der Arbeiten sind anwendungsorientierte Grundlagenuntersuchungen zur Modifizierung von Halbleitern mittels Ionenstrahlung, wobei mittelfristig Silicium und Siliciumcarbid im Vordergrund stehen. Schwerpunkte bilden dabei:

- die Ionenstrahlsynthese vergrabener isolierender, halbleitender oder leitender Schichten durch Hochdosisimplantation in Silicium,
- Grundlagenuntersuchungen zur Entstehung, Umwandlung und gezielter Nutzung bei der Implantation gebildeter Defekte,
- die zunehmende Nutzung der Hochenergieimplantation im MeV-Bereich für die zuvor genannten Aufgaben sowie
- der Einsatz von Ionenmikrostrahlen zur Erzeugung mesoskopischer Strukturen.

Ionenstrahlenwendung für Sensoren

Im Mittelpunkt der zukünftigen Arbeiten stehen Grundlagenuntersuchungen zur Ionenstrahlmodifizierung von Festkörperoberflächen zur Erzeugung sensitiver Schichteigenschaften für die chemische Mikrosensorik sowie für Strahlungssensoren. Sensoreigenschaften und Anwendungen werden in Form von Modelllösungen nachgewiesen.

Modifizierung von Metallen und anderen Werkstoffen

Grundlagenuntersuchungen zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften metallischer Werkstoffe, insbesondere zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit, werden bezüglich

- der Bildung neuer Phasen durch Hochdosisimplantation,
- des Ionenstrahlmischens von Schichtstrukturen und
- der Ionenstrahlgestützten Schichtabscheidung durchgeführt.

Theorie der Ionenstrahl-Festkörperphysik

Dieser Aufgabenkomplex umfaßt neben Zielstellungen, die sich aus obigen Programmen ergeben, auch eigenständige theoretisch-methodische Entwicklungen, die ihrerseits experimentelle Vorhaben anregen. Folgende Themen werden mittelfristig bearbeitet:

- Computersimulation ballistischer Prozesse der Ionenimplantation in kristalline Targets, verbunden mit Grundlagenuntersuchungen zur elektronischen Abbremsung schwerer Ionen, insbesondere bei Kanalisierung,
- Molekulardynamische Simulation der Wechselwirkung niederenergetischer Ionen mit kovalent gebundenen Halbleitern,
- Keimbildung und Ostwaldreifen neuer Phasen bei der Ionenstrahl-synthese und nachfolgendem Tempern,
- Kopplung von Dotanten- und Punktdefektdiffusion und Dotantenaktivierung in Silicium.

*** Festkörperanalytik**

Die Aufgaben zur Festkörperanalytik gliedern sich in zwei Richtungen, die entweder Ionen- oder Neutronenstrahlung nutzen.

Grundlagen der Ion-Festkörper-Wechselwirkung und Analytik

Die verfügbaren Methoden der Festkörperanalytik mit hochenergetischen Ionen (RBS, ERDA, PIXE, NRA, Kernmikrosonde) werden kontinuierlich im Rahmen der oben genannten eigenen Forschungsvorhaben sowie in Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern (Untersuchungen an Materialien für Fusionsreaktoren, Schichtstrukturen für Hochtemperatur-Supraleiter, Umweltanalytik, geologische Proben, Kunstgutuntersuchungen) genutzt.

Ein neues Arbeitsgebiet wird durch Experimente mit hochgeladenen Ionen eröffnet, für die eine ECR-Quelle installiert wird.

Strukturuntersuchungen mittels Neutronenstreuung

Die im November 1991 getroffene Entscheidung der Nichtwiederinbetriebnahme des Rossendorfer Forschungsreaktors erfordert die Nutzung experimenteller Untersuchungsmöglichkeiten an anderen Neutronenquellen und die stärkere Einbeziehung röntgenographischer Methoden, insbesondere zur Experimentvorbereitung. Schwerpunkte der wissenschaftlichen Thematik bilden

- Texturuntersuchungen,
- Strukturuntersuchungen im Zusammenhang mit strukturellen Phasenübergängen sowie an nichtkristallinen Substanzen und
- Experimente mit idealen Kristallen, insbesondere zum Nachweis extremer Kleinwinkelstreuung.

Die Arbeiten werden fast ausschließlich in Kooperation mit externen Partnern durchgeführt.

2.2. Institut für Festkörperphysik und Werkstofforschung Dresden (285 Mitarbeiter)

Das Institut für Festkörper- und Werkstofforschung in Dresden ist die größte außeruniversitäre Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der Materialforschung in Sachsen. Es gliedert sich in die drei Institute für Festkörperforschung, Metallische Werkstoffe sowie Struktur- und Festkörperanalytik. Die Aufgabengebiete dieser Institute sind nachfolgend stichpunktartig aufgeführt:

Festkörperforschung

- *Supraleitung und Magnetismus*: Theorie der elektronischen Struktur und des elektronischen Transports; kritische Stromdichte und Pinning von HTSL-Proben in hohen Magnetfeldern; Kontaktierung; Ultraschalldämpfung; Hochfrequenzeigenschaften; Präparation neuartiger Phasen aus Seltenerd- und Übergangsmetallen; Untersuchungen der Magnetisierungsprozesse in daraus hergestellten hartmagnetischen Stoffen

- *Dünne Schichten und Abscheidungsprozesse*: Elektronischer Transport und Elementarprozesse bei tiefen Temperaturen; amorphe und nanodisperse Systeme; elektron. Funktionsschichten; mechanische Eigenschaften und Stabilität in Schichtsystemen; Grenzwechselwirkungen; Verfahrensgrundlagen; Plasmaprozesse; PVD; neue Strukturmerkmale und Stoffsysteme

- *Anorganische Festkörpersynthese*: Phys.-chem. Grundlagen der Festkörpersynthese; thermodynamische Modellierung von Phasendiagrammen; Darstellungs- und Abscheidungsprozessen; Phaseninstabilitäten in Mehrkomponentensystemen; Zusammenhang von Verfahrens-

parametern; Stöchiometrie; Struktur und Eigenschaften; HTSL-Materialien kompakt und in Schichten elektrisch leitfähige Oxide; Hartstoffschichten

- *Elektrochemie und leitfähige Polymere*: Theorie niederdimensionaler Systeme; hochorientierte leitende Polymere; neue SN-Heterocyclen; Ladungstransfer-Komplexe; Heterobipolarstrukturen; elektrochem. Untersuchungen an Polymerfilmen; ESR; Polymerelektroden; Beweglichkeitsuntersuchungen

Metallische Werkstoffe

- *Bildung metallischer Phasen*: Dünnbandgießen; Erstarrungsmechanismen und Gefügeentstehung bei endabmessungsnahem Gießen; Kristallzüchtung und Strukturcharakterisierung; Phasenbildung aus unterkühlten Schmelzen; Ermittlung thermodynamischer Daten und Phasengrenzen

- *Strukturbildungsprozesse*: Grundlagen der Gefügeentwicklung bei der Warmumformung einschließlich Simulation von Umformprozessen mittels Torsionsplastometer; TMB mikrolegierter höherfester Stähle einschließlich Ausscheidungsverhalten in komplex mikrolegierten Stählen; Prozeßmodellierung/Computersimulation von Umformprozessen unter Einbeziehung der Gefügeentwicklung und Gefüge/Eigenschaftsrelationen; Grundlagen und Entwicklung neuer bzw. verbesserter metallischer Werkstoffe; Mikrostrukturelle Grundlagen der Gefügeentwicklung in Warm- und Kaltband mit Applikation bei der Technologie und Werkstoffentwicklung verbesserter Elektrobleche

- *Festigkeit und Umgebungseinflüsse*: Grundlagenuntersuchungen zu Mechanismen und Kinetik der Ribbildung und Ribausbreitung in metallischen Werkstoffen bei zyklischer mechanischer Belastung einschließlich der Einwirkung erhöhter Temperaturen und aggressiver Umgebungen; Bewertung des Einsatzverhaltens moderner Konstruktionswerkstoffe mittels bruchmechanischer Methoden; Aufklärung umgebungsabhängiger Schädigungsprozesse; Entwicklung schädigungstoleranter Werkstoffe

- *Tribologische Probleme der Massivumformung*: Grundlagen der Plastizität von Oberflächen bei der Massivumformung; Entwicklung umweltverträglicher filmbildender Feststoffschmiermittel sowie von Beschichtungs- und Umformtechnologien; Aufklärung umformtechnischer und werkstoffspezifischer Zusammenhänge unter den Bedingungen der Druckschmierung; Bearbeitung von Problemen zu Abrieb und Verschleiß metallischer Werkstoffe

- *Sonderwerkstoffe*: Entwicklung nanokristalliner weichmagnetischer Legierungen mit innovativen Eigenschaftskonzeptionen; höchstpermeable FeNi-Legierungen für Fehlerstromschutzschalter

mit Allstromanwendung; Anisotrope SEFeB-Pulver für Plastmagnete hoher Energiedichte; Untersuchungen zur Bewertung und zum Verständnis anomaler Verluste in weichmagnetischen Legierungen

- *Schmelzmetallurgie*: Grundlagenuntersuchungen zum Bandbildungsprozeß bei der Schnellerstarrung mittels Einwalzenverfahren; Untersuchungen zur Herstellung von Hochtemperatursupraleitern mit hoher Stromtragfähigkeit in äußeren Magnetfeldern

- *Umformung und Wärmebehandlung*: Entwicklung hochdämpfender Legierungen und Werkstoffe mit pseudoelastischen und Formgedächtniseffekten; Technologische Untersuchungen zur Herstellung von Drähten und Bändern aus Hochtemperatursupraleitern

Strukturforschung und Festkörperanalytik

- *Oberflächen- und Mikrobereichsanalytik*: Ionen-Festkörper-Wechselwirkung; Bindungszustände an Oberflächen; Gewinnung und Darstellung lateraler Elementverteilungen; Methoden der Chemometrik; Abbildende Strukturmethoden; Laser-Festkörper-Wechselwirkung; Quantifizierung der Elementarprozesse Elektron-Festkörper

- *Röntgenstrukturforschung*: Beiträge zur Konstitutionsforschung; Erfassung und Auswertung zweidimensionaler Spannungsfelder; Strukturmodellierung

- *Chemische Analyse*: Elektrochemische Festkörpercharakterisierung; Stöchiometrie- und Bindungszustandsermittlung

2.3. Institut für Polymerforschung Dresden

(170 Mitarbeiter)

Forschungsgegenstand des Instituts für Polymerforschung ist die angewandte Grundlagenforschung zu

- Synthese und chemische Modifizierung von Polymeren
- Entwicklung von neuen Verbundwerkstoffen mit polymerer Matrix
- Erforschung des Zusammenhangs zwischen innerer Struktur polymerer Materialien und deren Verarbeitungseigenschaften

Die wissenschaftliche Arbeit ist in 3 Teilinstituten orientiert, deren Aufgabenbereiche schlagwortartig genannt sind:

Makromolekulare Chemie

theoretisch orientierte Arbeiten zu Reaktionsprinzipien, zur Reaktionskinetik und zur Thermodynamik von Polymeren und ihren

Mischungen; Untersuchungen zur Synthese- und Modifikationsreaktionen in Polymerschmelzen; Entwicklung von Polymerblends

Physikalische Chemie und Physik der Polymere

Beeinflussung von Polymerverarbeitungsprozessen und Werkstoffeigenschaften durch Grenzflächenphänomene; theoretische und experimentelle Arbeiten zur Charakterisierung von Grenzflächen und an ihnen auftretende Wechselwirkungskraften, die Zuordnung von Wechselwirkungskraften zur chemischen und physikalischen Struktur von Polymeren und Modellierung von Zusammenhängen zwischen Grenzflächenparametern und praxisrelevanten Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften; Modellierung der Fadenbildung von Polymeren

Polymerwerkstoffe

gezielte Verleihung gewünschter Eigenschaften durch chemische und physikalische Modifizierung der Werkstoffoberfläche, der Polymermatrix oder der Grenzschichten in polymeren Verbundwerkstoffen; dünne und ultradünne Polymerschichten und technische Membranen; Grundlagenuntersuchungen zur Compoundierung von Thermoplasten durch Extrusion, zum Fließverhalten und zum Spritzguß

2.4. Institut für Oberflächenmodifizierung Leipzig (60 Mitarbeiter)

Das Institut betreibt anwendungsorientierte Forschung auf den Gebieten Elektronenstrahl- und Ionenstrahltechnik, einschließlich methodischer Entwicklungen.

Ionenstrahltechnik

Charakterisierung von Grundprozessen des Materialabtrages und der Materialabscheidung an Festkörperoberflächen unter Beteiligung von niederenergetischen Ionen oder von UV-Laserstrahlung; Materialien mittels (R) IBE, CAIBE und UV-Laser-induziertem Ätzen in Reaktivgasatmosphäre (LIE); Oberflächenbearbeitung mit Nanometer-Tiefengenauigkeit insbesondere für optische und röntgenoptische Anwendungen; anwendungsorientierte Grundlagenforschung zur Ionenstrahl-gestützten Schichterzeugung (IBAD, RIBAD)

Elektronenstrahltechnik

Elektronenstrahlhärtung (ESH) lösungsmittelfreier Monomere/Oligomer-Beschichtungen auf festen und flexiblen Substraten; Charakterisierung der Polymerisations- und Vernetzungsprozesse von ES-härtbaren Modellbeschichtungen durch zeitaufgelöste Methoden, wie Pulsradiolyse und Elektronenstrahl-Kalorimetrie sowie stationäre analytische Untersuchungen; Modifizierung von Polymereigenschaften durch ionisierende Strahlung; Entwicklung von Niederenergiebeschleunigern des LEA-Typs, Untersuchungen zu neuartigen Bremsstrahlungsquellen und Laserelektronenquellen

3. Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft

3.1. Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik Dresden (75 Mitarbeiter)

- Entwicklung von Elektronenstrahlkanonen und Plasmaquellen mit den unterschiedlichsten Parametern
- Einsatzvorbereitung neuer Technologien; das Veredeln von Oberflächen, wie die Modifikation und die Dünnschichtabscheidung durch Bedampfen und Spattern
- Herstellung dünner Schichten durch Hochrate-PVD-Techniken
- Oberflächenmodifikation mit Elektronenstrahlen und Plasmen, Modellierung, Aufskalierung und Qualitätssicherung

3.2. Fraunhofer-Institut für Werkstoffphysik und Schichttechnologie Dresden (55 Mitarbeiter)

- Verfahren zur lasergestützten Abscheidung von Einfach- und Vielschichten im Nanometerbereich zur Erzeugung von Schichtsystemen, z. B. mit besonderen röntgenoptischen und mechanischen Eigenschaften
- Verfahren zur lasergesteuerten Vakuumbogenabscheidung von Hartstoff- und Kohlenstoffschichten mit variablem Eigenschaftsspektrum
- Technologieorientierte und bauteilbezogene Forschung zur Festphasenumwandlung, zum Um- und Einschmelzen, Legieren sowie Beschichten von metallischen Werkstoffen und zur Auswahl und Optimierung von Zusatzwerkstoffen
- Werkstoffwissenschaftliche Grundlagen der Verfahrens- und Parameterwahl zur Entwicklung von Software für die rechnergestützte Prozeßvorbereitung, -führung und -optimierung
- Bestimmung eigenschaftskontrollierender Faktoren bei der Anwendung von Strahltechnologien sowie Eigenschaftsprognose für komplexe Beanspruchungsfälle

3.3. Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe Dresden (75 Mitarbeiter)

- Pulvertechnologie für Werkstoffentwicklung zur Herstellung von defektarmen Werkstoffen und Bauteilen
- Werkstoff- und Bauteilentwicklung in der Strukturkeramik
- Entwicklung von Funktionskeramiken für elektrische, dielektrische, ferroelektrische und piezoelektrische Elemente

3.4. Fraunhofer-Institut für Umformtechnik und Werkzeugmaschinen Chemnitz (95 Mitarbeiter)

- Umformverfahren im Hinblick auf Material- und Energieanpassung, Erhöhung der Flexibilität, Prozeßstabilität und Fertigungsqualität
- Entwicklung von Umformmaschinen unter besonderer Berücksichtigung fertigungstechnischer Anforderungen
- Qualitätssicherung

- Grundlagenforschung in den Bereichen Umformbarkeit, Werkstoffkennwerte, Schadensanalyse, Werkzeugwerkstoffe, Plastizitätstheorie
- Meß- und Prüftechnik; interferometrische Werkstoff- und Bauteilanalyse, Bildverarbeitung zur Oberflächenprüfung, Charakterisierung von Verbunden durch Infrarot- und Lasertechnik

3.5. Fraunhofer-Einrichtung für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme Dresden (130 Mitarbeiter)

- CMOS-Technologie
- Ausbeute und Zuverlässigkeit (Defektmechanismen)
- Sensorik (Magnetfeldsensoren, optische und Strahlungssensoren, integrierte Optik auf Silizium, mikromechanische Sensoren auf Basis der SOI-Technik, chemische Sensoren)
- Mikrosystementwicklung
- Signalverarbeitung für Mikrosysteme
- Systementwicklung und Systementwurfstechnik

3.6. Außenstelle für Automatisierung des Schaltkreis- und Systementwurfs Dresden (30 Mitarbeiter)

(FhI für Integrierte Schaltungen, Erlangen)

Entwicklung von Methoden und Werkzeugen für den rechnergestützten Entwurf von anwendungsspezifischen Schaltkreisen und Systemen

- Verfahren und Werkzeuge zur Simulation (Netzwerkanalyse)
- Verfahren und Werkzeuge zur Synthese digitaler Systeme
- Verfahren und Werkzeuge zur Testpatterngenerierung und Verifikation
- Entwurf von anwendungsspezifischen Schaltkreisen (ASIC#S) und Systemen

3.7. Außenstelle für Pulvermetallurgie und Verbundwerkstoffe Dresden (20 Mitarbeiter)

(FhI für Angewandte Materialforschung Bremen)

- Hochtemperaturwerkstoffe (Intermetallide, metallische Hochtemperaturwerkstoffe, Verbundwerkstoffe und Leichtbaustrukturen)
- Fasermetallurgie (Schnellerstarrung bei Schmelzextraktion, Faserherstellung und -anwendung, MMC's)
- Tribologische Sonderwerkstoffe
- Pulvertechnologie (Pulveraufbereitung, Verdichtung, Sintern)

3.8. Außenstelle für Akustische Diagnostik und Qualitätssicherung Dresden/Rosendorf (30 Mitarbeiter)

(FhI für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken)

Übersicht über die Synchrotronstrahlungsquellen in der Welt

Die Übersicht wurde aus *Synchrotron Radiation News* (1991), vol. 4, No. 5, p. 23-26 entnommen.

Die Tabellen sind entsprechend der Einteilung in Generationen gegliedert. Die Erläuterung zu der Abgrenzung zwischen den einzelnen Generationen findet man jeweils im Tabellenkopf.

Overview of synchrotron radiation sources world-wide

Vol. 4, No. 5, 1991, *Synchrotron Radiation News*

Table 1. First generation storage ring sources. The first generation of storage ring sources were built as part of high-energy physics programs and initially used parasitically and then in most cases as dedicated sources. The emittances of these rings are generally in the hundred to several hundred nanometer radian range. However, the large colliders (PEP, PETRA and Tristan) can achieve very low emittance when operated in a dedicated mode at low energy.

Location	Ring (Inst.)	Electron Energy (GeV)	Notes
CHINA			
Beijing	BEPC (Inst. High En. Phys.)	1.5 - 2.8	Partly Dedicated
DENMARK			
Aarhus	ASTRID (ISA)	0.6	Partly Dedicated
FRANCE			
Orsay	DCI(LURE)	1.8	Dedicated
	ACO(LURE)	0.54	**
GERMANY			
Bonn	ELSA (Bonn Univ.)	3.5	Partly Dedicated
Hamburg	DORIS II (HASYLAB)	3.5 - 5.5	Partly Dedicated
	PETRA (HASYLAB)	6 - 13	Planned Use
ITALY			
Frascati	ADONE (LNF)	1.5	Partly Dedicated
JAPAN			
Sendai	TSSR (Tohoku Univ.)	1.5	Proposed/Part. Ded.
Tsukuba	Accumulator Ring (KEK)	6	Partly Dedicated
	Tristan Main Ring (KEK)	6 - 30	Planned Use
NETHERLANDS			
Amsterdam	AmPS	0.9	Planned Use*
Eindhoven	EUTERPE (Tech. Univ. Eind.)	0.4	Planned Use*
USA			
Gaithersburg, MD	SURF II (NIST)	0.28	Dedicated
Ithaca, NY	CESR (CHESS)	5.5	Partly Dedicated
Stanford, CA	SPEAR (SSRL)	3 - 3.5	Dedicated
	PEP(SLAC/SSRL)	5 - 15	**
Stoughton, WI	Tantalus (SRC)	0.24	**
USSR			
Novosibirsk	VEPP-2M (Inst.Nucl.Phys.)	0.7	Partly Dedicated
	VEPP-3 (Inst.Nucl.Phys.)	2.2	Partly Dedicated
	VEPP-4 (Inst.Nucl.Phys.)	5 - 7	Partly Dedicated

* In construction as of May 1991.

** Withdrawn from operation.

Table 2. **Second generation sources.** These are defined as storage rings which were designed for use as dedicated sources. They have emittances in the range 40-150 nanometer radians. Many of these have immense capacity, some supporting over 50 beamlines and over 2000 users. Recognizing the need for even brighter sources, most of these second generation machines have one or several insertion devices incorporated.

Location	Ring (Inst.)	Electron Energy (GeV)	Notes
CHINA (PRC)			
Hefei	HESYRL (USTC)	0.8	Dedicated
ENGLAND			
Daresbury	SRS (Daresbury)	2	Dedicated
GERMANY			
Berlin	BESSY	0.8	Dedicated
INDIA			
Indore	INDUS-I (Ctr.Adv.Tech.)	0.45	Dedicated*
JAPAN			
Okasaki	UVSOR (Inst.Mol.Science)	0.75	Dedicated
Osaka	KANSAI SR	2.0	Proposed/Dedicated
Tokyo	SOR-Ring (U of Tokyo-ISSP)	0.38	Dedicated
Tsukuba	TERAS (ElectroTech.Lab.)	0.6	Dedicated
Tsukuba	Photon Factory(KEK)	2.5	Dedicated
SWEDEN			
Lund	MAX(Univ. of Lund)	0.55	Dedicated
USA			
Baton Rouge,LA	CAMD (Louisiana State Univ)	1.2	Dedicated*
Stoughton,WI	Aladdin (SRC)	0.8-1	Dedicated
Upton,NY	NSLS I (Brookhaven Lab.)	0.75	Dedicated
	NSLS II (Brookhaven Lab.)	2.5	Dedicated
USSR			
Kharkov	N-100 (KPI)	0.1	Dedicated
Moscow	Siberia I (Kurchatov Inst)	0.45	Dedicated
	Siberia II (Kurchatov Inst)	2.5	Dedicated*
Zelenograd	TNK (F.V. Lukin Inst.)	1.2 - 1.6	Dedicated*

* In construction as of 5/91

Table 3. **Third generation sources.** Present rings cannot achieve the full performance of insertion devices, particularly the high brightness that can be produced by undulators. The third generation of synchrotron storage rings addresses this problem with rings designed to have even lower emittance (≤ 40 nanometer radians) and long straight sections for insertion device installation. Note that PEP, PETRA and TRISTAN operated at lower energies become 3rd. generation sources and that although there is no commitment to their use, there are beamlines already at PEP and design studies of low emittance optics and beamline arrangements have been done at PETRA and Tristan.

Location	Ring (Inst.)	Electron Energy (GeV)	Notes
BRAZIL			
Campinas	LNLS-1	1.15	Dedicated*
CHINA (ROC-TAIWAN)			
Hsinchu	SRRC (Synch.Rad.Res.Ctr.)	1.3	Dedicated*
ENGLAND			
Daresbury	DAPS (Daresbury Lab.)	.5 - 1.2	Proposed/Dedicated
FRANCE			
Grenoble	ESRF	6	Dedicated*
	SuperACO (LURE)	0.8	Operating
GERMANY			
Dortmund	DELTA (Dortmund Univ.)	1.5	Dedicated/FEL Use*
Berlin	BESSY II	1.5 - 2	Proposed/Dedicated
INDIA			
Indore	INDUS-II (Ctr.Adv.Tech.)	2	Proposed/Dedicated
ITALY			
Trieste	ELETTRA (Synch.Trieste)	1.5 - 2	Dedicated*
JAPAN			
Hiroshima	HISOR (Hiroshima Univ.)	1.5	Proposed/Dedicated
Kyushu	SOR (Kyushu Univ.)	1.5	Proposed/Dedicated
Nishi Harima	SPring-8 (Sci.Tech.Agency)	8	Dedicated*
KOREA			
Pohang	Pohang Light Source	2	Dedicated*
SWEDEN			
LUND	MAX II (Univ. of Lund)	1.5	Dedicated*
USA			
Argonne,IL	APS (ANL)	7	Dedicated*
Berkeley,CA	ALS (LBL)	1.5	Dedicated*
USSR			
Kharkov	HP-2000	2.0	Dedicated*

* In construction as of 5/91

Table 4. **Synchrotron storage rings designed exclusively for use as X-ray lithography sources.** SHI is Sumitomo Heavy Industries, IHI is Ishikawajima-Harima Heavy Industries, ETL is the Electrotechnical Laboratory. The IBM ring at E. Fishkill was developed in England by Oxford Instruments. NTT is Nippon Telegraph and Telephone Corporation. The NAR ring was built by Toshiba and SUPER-ALIS by Hitachi.

GERMANY			
Berlin	COSY	0.59	**
JAPAN			
Atsugi	NAR (NTT)	0.8	Operational
Atsugi	SUPER-ALIS (NTT)	0.6	Operational
Tokyo	AURORA (SHI)	0.65	Operational
Tsukuba	LUNA (IHI)	0.8	Operational
Tsukuba	NIJI II (ETL)	0.6	Operational
Tsukuba	NIJI III (ETL)	0.62	Operational
Tsukuba	SORTEC (ETL)	1.0	Operational
USA			
E. Fishkill, NY	HELIOS (IBM)	0.7	Operational
Upton, NY	SXLS (Brookhaven Lab)	0.7	Construction
USSR			
Novosibirsk	SIBERIA-SM	0.6	Construction

** Withdrawn from operation.

1. Lage und Territorium

Das Gelände des Forschungszentrums Rossendorf befindet sich 7 km östlich des Stadtrandes von Dresden und ist 15 km Luftlinie vom Stadtzentrum Dresden entfernt. Die Zufahrt zum Institut liegt am km 84 der Bundesstraße 6 im Streckenabschnitt Dresden-Bautzen. Das Territorium des Zentrums (auf dem allerdings noch andere Organisationen angesiedelt sind) umfaßt eine Fläche von 180 ha, wovon nur 6,5 ha bebaut sind. Die für die weitere Bebauung noch verfügbare Fläche beträgt ca. 71 ha.

Die Höhenlage erstreckt sich zwischen 270 und 300 m über NN. Der Stadtkern Dresdens liegt zum Vergleich bei 120 m über NN.

2. Geologische und seismologische Verhältnisse

Der Baugrund besteht im wesentlichen aus Sanden und Kiesen, deren Mächtigkeit bis 30 m Tiefe reicht. Es folgt dann Geschiebemergel und Lockergestein. Diese Bodenbeschaffenheit weist eine gute Tragfähigkeit für Bauwerke auf.

Der Grundwasserspiegel liegt im Mittel bei 11 bis 23 m unter der Oberfläche. Aufgrund vorangegangener Bauvorhaben sind zahlreiche geologische und hydrologische Untersuchungen durchgeführt worden, die Aufschluß über die Bodenverhältnisse geben.

Das mittel- und ostsächsische Gebiet ist nicht erdbebengefährdet.

3. Zugänglichkeit, Transportverhältnisse

Für das Territorium des FZR bestehen nachstehende Verkehrsanbindungen :

Straßentransport:	Bundesstraße 6 (Abschnitt Dresden-Bautzen)		
	unmittelbar am Institut vorbeiführend		
	Autobahn A 4 (Abschnitt Dresden-Bautzen)		
	Anschluß Leppersdorf	Entfernung	13 km
Schifftransport:	Hafen Dresden-Friedrichstadt		
		Entfernung	20 km
Lufttransport:	Flughafen Dresden-Klotzsche		
		Entfernung	25 km
Bahntransporte:	Bahnhof Arnsdorf	Entfernung	9 km
	oder Radeberg	Entfernung	8 km

Es besteht die Möglichkeit für die Verlegung eines Anschlußgleises vom Bahnhof Arnsdorf zum Forschungszentrum Rossendorf. Die Länge der Strecke beträgt 7 km.

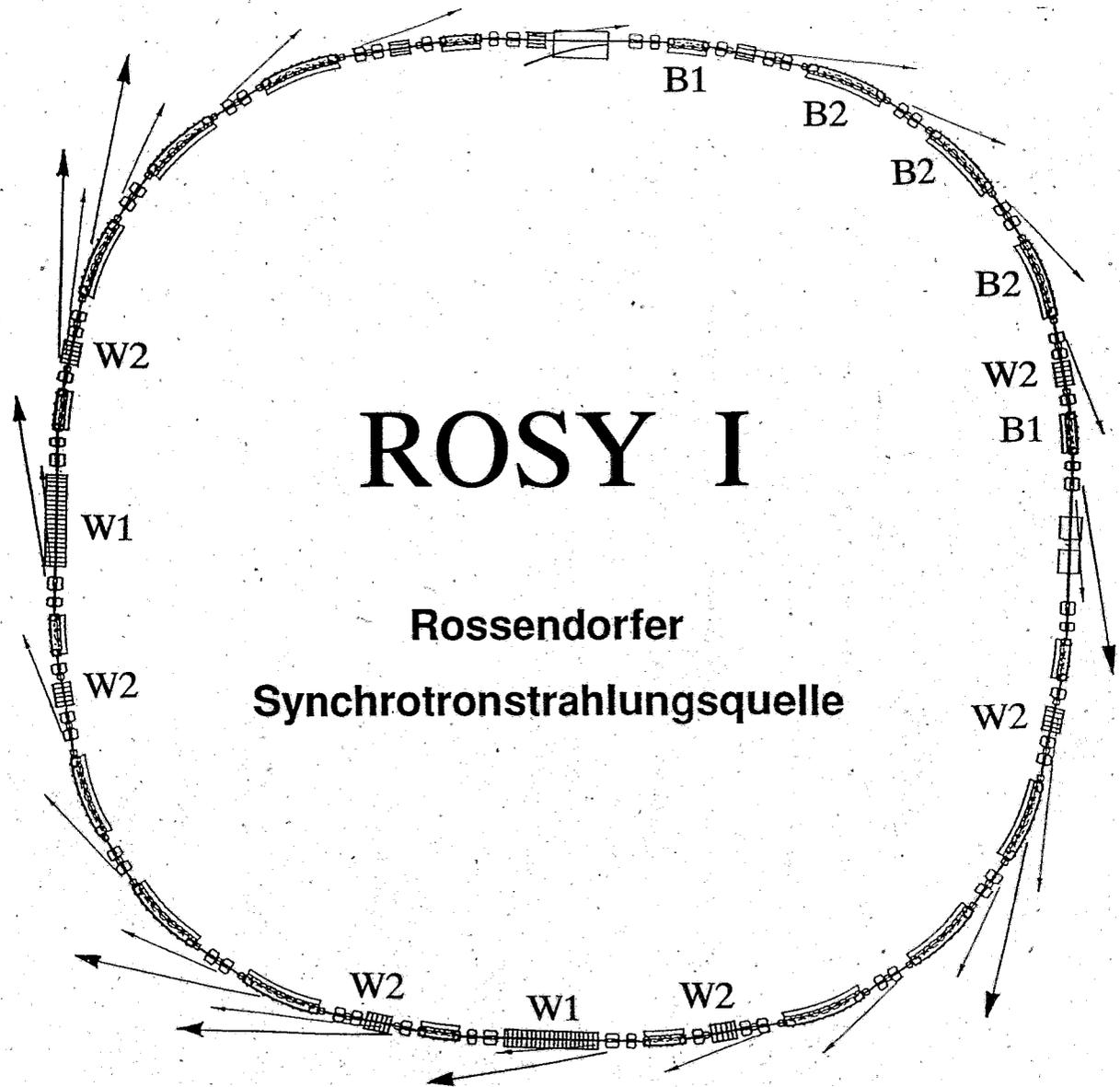
4. Elektrische Energieversorgung

Der erforderliche Bedarf wird sicher die freigesetzte Kapazität infolge der personellen Verkleinerung des Forschungszentrum zu Anfang 1992 übersteigen, kann aber durch den Anschluß an die in ca. 4 km Entfernung südlich des Institutsgeländes vorbeiführende 380 kV Hochspannungsleitung gesichert werden. Das bestehende Notstromnetz enthält für den Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle keine Reserven.

5. Wasser, Kühlung und Abwärme, Vorfluter für Abwasser

Die Wasserversorgung des Standortes Rossendorf erfolgt über eine Fernleitung aus dem bestehenden Trinkwassernetz der Stadt Dresden. Für die Kühlung kerntechnischer Großgeräte sind Trockenkühltürme und Industriekühler im Einsatz. Die Kühlleistung zur Abführung der thermische Leistung kann über Trockenkühlanlagen erfolgen.

Das Abwasser des FZ Rossendorf wird in einen Bach mit einer mittleren Wasserführung von $MQ = 0,02 \text{ m}^3 / \text{s}$ eingeleitet. Der Bach wird nach etwa 3 km Fließstrecke von dem Fluß Wesenitz mit $MQ = 2,2 \text{ m}^3 / \text{s}$ aufgenommen. Die Wesenitz mündet nach etwa 18 km Fließstrecke in den Fluß Elbe. Die Elbe besitzt an dieser Einmündungsstelle eine mittlere Wasserführung von $MQ = 320 \text{ m}^3 / \text{s}$. (MQ-Werte nach DIN 4049).



ROSY I

Rosendorfer
Synchrotronstrahlungsquelle

TEIL II
Maschinenkonzept
- Juni 1992 -

Inhaltsverzeichnis

1.	ALLGEMEINES	
2.	MAGNETSTRUKTUR FÜR DEN SPEICHERRING ROSY I	II-4
	2.1 Einführung	
	2.2 Aufbau und Eigenschaften der Einheitszelle	II-7
3.	ACHROMAT DES SPEICHERRINGES ROSY I	II-15
4.	SPEICHERRINGKOMPONENTEN	II-25
	4.1 Ablenkmagnete	II-25
	4.2 Quadrupole	II-33
	4.3 Sextupole	II-34
	4.4 Netzgeräte	II-36
	4.5 Hochfrequenzsystem	II-38
	4.6 Kontroll- und Informationssystem	II-46
5.	INJEKTOR	II-50
6.	SPEICHERRING ROSY II	II-54
	6.1 Einführung	II-54
	6.2 Magnetstruktur von ROSY II	II-55
	6.3 Achromat des Speicherringes ROSY II	II-62
	6.4 Speicherringkomponenten für ROSY II	II-77
	6.4.1 Ablenkmagete	II-77
	6.4.2 Quadrupole	II-79
	6.4.3 Sextupole	II-81
	6.4.4 Hochfrequenzsystem	II-83
7.	UNDULATOREN UND WIGGLER	II-86
	7.1 Undulatoren und Wiggler für ROSY II	II-91
	7.2 Undulatoren und Wiggler für ROSY I	II-95
8.	Synchrotronstrahlungscharakteristiken	II-100
	8.1 Eigenschaften der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I	II-100
	8.2 Vergleich verschiedener Synchrotronstrahlungsquellen	II-110
	8.3 Brillanz der Synchrotronstrahlung in Ablenkmagneten	II-115
9.	ANHANG	II-118
	9.1 Beugungsbegrenzte Strahlungsquellen	II-118
	9.2 A Modified QBA-Optics for Low Emittance Storage Rings	II-124
10.	LITERATURVERZEICHNIS	II-134

1. ALLGEMEINES

Die Parameter einer Speicherringanlage zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung werden durch die Anforderungen der Nutzer bestimmt. Wie in der wissenschaftlichen Begründung [1] dargelegt, soll die Synchrotronstrahlungsquelle ROSY dediziert für die physikalisch orientierte Materialforschung genutzt werden. Im Freistaat Sachsen arbeiten etwa 16 Institute mit über 800 Mitarbeitern im Bereich der Materialforschung. Die Auslegung der SR-Quelle ROSY orientiert sich an den Forderungen der strukturbezogenen Materialforschung. Insbesondere wird verlangt: ein Photonenpektrum von 0,5 keV bis 30 keV, Quellgrößen von 100 bis 500 μm , Photonenflüsse von größer als 10^{14} Photonen pro Sekunde und 0,1 % relative Bandbreite sowie eine Lebensdauer von mindestens 5 Stunden.

Die Hauptparameter der Speicherringanlage wie Energie (E), Ablenkradius (R) und magnetische Flußdichte (B) in den Ablenkmagneten sind durch das geforderte Synchrotronstrahlungsspektrum bestimmt. Das kontinuierliche Spektrum der Synchrotronstrahlung wird beschrieben durch die kritische Wellenlänge λ_c bzw. die kritische Photonenenergie E_c . Die Abhängigkeit dieser Größen von den Maschinenparametern sind durch die folgenden Formeln gegeben:

$$\lambda_c [\text{nm}] = 1.864 / [(B/T) \times (E/\text{GeV})^2] \quad (1)$$

$$E_c [\text{keV}] = 0.665 \cdot (B/T) \times (\text{GeV})^2 \quad (2)$$

Aufgrund der erwähnten Forschungsschwerpunkte, die durch diese Anlage bedient werden sollen, muß vorwiegend Synchrotronstrahlung im Energiebereich von 5 - 18 keV ($E_c = 9$ keV) emittiert werden. Wird die Ablenkung des Elektronenstrahles mit normaleitenden Magneten durchgeführt, ($1 \text{ T} \leq B \leq 1,5 \text{ T}$), so liegt die erforderliche Energie des Speicherringes zwischen 3 und 3,5 GeV und der Ablenkradius in den Ablenkmagneten zwischen 7 und 10 m.

Die Quellgröße des gespeicherten Elektronenstrahles wird durch die Emittanz bestimmt, die durch den Verlauf der den Beschleuniger beschreibenden Maschinenfunktion [Amplituden- oder Betatron- und Dispersionsfunktion ($\beta_x(s)$ und $\eta_x(s)$)] bzw. durch die Magnetstruktur des Speicherringes gegeben ist.

Zur Erreichung der geforderten Quellgröße von 100 bis 500 μm werden Emittanzen von 3 bis 50 πnmrad benötigt. Photonenflüsse von größer als 10^{14} Photonen pro Sekunde und 0,1 % Bandbreite werden nur durch den Einbau von Wigglern und Undulatoren erreicht.

Die Erfüllung der Bedingungen: $\epsilon_x \approx 3 \pi\text{nmrad}$, Photonenflüsse $> 10^{15}$ Photon pro Sekunde 0,1 % BW mit einem Photonenpektrum von 2 - 30 keV ist nur mit einer 3 GeV-SR-Quelle der 3. Generation

mit einem Umfang von $U \approx 300$ m zu erreichen. Die Bedingung $\epsilon_x = 50 \text{ } \mu\text{mrad}$ mit Flüssen um 10^{14} Photonen pro Sekunde und 0,1 % BW können mit einer 3 GeV-Maschine im Grenzbereich zwischen der 2. und der 3. Generation liegend, erfüllt werden.

Für den Entwurf einer Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation mit Emittanzen um $3 \text{ } \mu\text{mrad}$ wird ein längerer Zeitraum benötigt und dies sollte im engen Kontakt mit den Nutzern geschehen. Um einerseits eine ausgereifte Konzeption für eine Synchrotronstrahlungsquelle erarbeiten zu können und andererseits möglichst in einem kurzen Zeitraum Synchrotronstrahlung zur Verfügung zu stellen, ist es vorgesehen, den Aufbau der Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle ROSY mit einer mittleren Größe ROSY I zu beginnen, wobei eine perspektivische Erweiterung zu einer Hochbrillanz-Quelle der 3. Generation ROSY II von vornherein als Option vorgesehen ist.

ROSY I: Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I der 2./3. Generation. Mit ROSY I soll ein Strahlungsspektrum zur Verfügung gestellt werden, mit dem eine Vielzahl von Experimenten im Bereich der Materialforschung durchgeführt werden kann.

ROSY II: Konzeption und Aufbau einer Synchrotronstrahlungsquelle der 3. bzw. 4. Generation (ROSY II). ROSY II soll Synchrotronstrahlung im Energiebereich von 5 - 18 keV mit hoher Brillanz zur Verfügung stellen. ROSY I soll nach der Realisierung des 2. Schrittes als Injektor für den Speicherring ROSY II dienen.

Die Magnetstruktur des Speicherringes ROSY I sollte einerseits die Bedingung einer kleinen Emittanz ($\epsilon_x \leq 50 \text{ } \mu\text{mrad}$) erfüllen und andererseits aus Kostengründen sehr kompakt sein. Als Magnetstruktur für Synchrotronstrahlungsquellen werden vorwiegend verwandt: DOUBLE-BENDING-ACHROMATS (DBA-Struktur) [2], TRIPLE-BENDING-ACHROMATS (TBA-Struktur) [3], FODO - [4] und TRIPLET-Struktur [10]. Die Emittanzen der verschiedenen Strukturen lassen sich über den Zusammenhang [4]:

$$\epsilon_x = C_q \frac{\gamma^2}{J_x} \Phi^3 k F(\mu) = C_q \frac{\gamma^2}{J_x} \Phi^3 k^*$$

vergleichen (die verschiedenen Größen sind im folgenden Abschnitt erläutert). In der folgenden Tabelle sind exemplarisch einige Synchrotronstrahlungsquellen und ihre Strukturen zusammengestellt und auf Werte für ROSY I skaliert.

Ring	Struktur	k^*	E	Φ	ϵ	ϵ^*
SRS-II	FODO	2.48	2.0	22.5°	110	250
NLSL-X	DBA	0.0645	2.5	22.5	100	144
BESSY I	TBA	0.0502	0.8	30°	55	326
BESSY II	TBA	0.0502	1.7	12°	6.4	131
DELTA	TRIPLET		1.5	20°	11	62.6

E ist angegeben in GeV, ϵ ist angegeben in mm rad,

ϵ^* ist auf ROSY I -Werte [E= 3 GeV, $\Phi= 22.5^\circ$] skaliert,

Aus dem Vergleich der Strukturen folgt, daß nur die TRIPLET-Struktur für den Speicherring ROSY I infrage kommt. Diese TRIPLET-Struktur kann durch die Einführung eines Gradienten in den Ablenkmagneten zu einer SINGULET- bzw. modifizierten FODO-Struktur vereinfacht werden. Eine entsprechende neuartige Optik wurde für den Speicherring ROSY I erarbeitet. Bei einem Umfang von $U = 120$ m und einer Energie von $E = 3$ GeV lassen sich mit dieser modifizierten FODO-Struktur Emittanzen von $\epsilon_x < 40$ π nmrad erreichen. Diese modifizierte FODO-Struktur, beschränkt auf 4 Ablenkmagnete pro Achromat, führt zur modifizierten QBA-Struktur [9], die für den Speicherring ROSY II vorgeschlagen wird und zu Emittanzen um 3 π nmrad bei $E = 3.2$ GeV führt.

In der Kürze der Zeit ist es nicht möglich, alle Punkte zum Maschinenkonzept (Injektion, Vakuumsystem, Diagnostik, Fehleraufstellung usw.) zu behandeln. Dies soll jedoch in sehr kurzer Zeit nachgeholt werden. Mit diesem vorliegenden Konzept sind jedoch die wichtigsten Punkte festgeschrieben.

Die Erarbeitung eines Maschinenkonzeptes ist ein kontinuierlicher Prozeß und während der Abfassung des Berichtes werden weitere (verbesserte) Ergebnisse erreicht, die nicht mehr in die Abbildungen und Darstellungen einfließen können. Die Daten in den Tabellen wurden jedoch jeweils aktualisiert.

2. MAGNETSTRUKTUR FÜR DEN SPEICHERRING ROSY I

2.1 Einführung

Die Emittanz eines Beschleunigers ergibt sich aus dem Verlauf der Betafunktion $[\beta_x(s)]$ und der Dispersionsfunktion $[\eta_x(s)]$ entsprechend den folgenden Formeln:

$$\epsilon_{x0} = Cq \cdot \frac{\gamma_0^2}{J_x} \cdot \frac{\langle |h^3| \cdot H \rangle_t}{\langle h^2 \rangle_t} \quad (3)$$

$$H = \frac{1}{\beta} (\eta^2 + [\beta\eta' - \frac{1}{2}\beta'\eta]^2) \quad (4)$$

$$= \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_x' + \beta_x \eta_x'^2$$

$$\gamma = \frac{1 + \alpha^2}{\beta} \quad \alpha = -\frac{1}{2} \beta' \quad (5)$$

$$J_x = 1 - D, \quad J_y = 1, \quad J_s = 2 + D \quad (6)$$

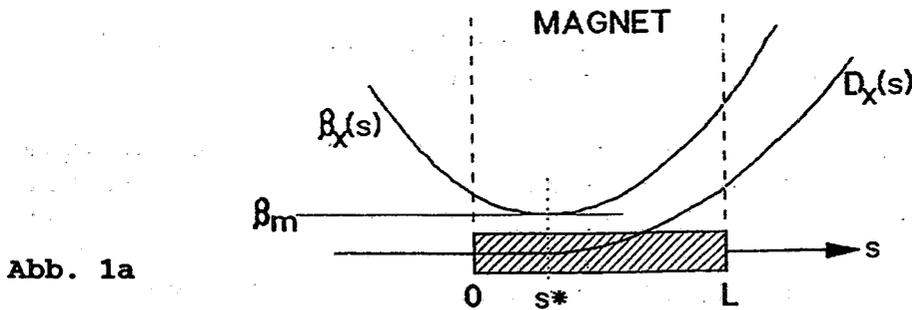
$$h = \frac{1}{\rho}$$

Cq =	$3.84 \times 10^{-13} \text{ m}$
$\gamma_0 =$	$1957 \times [E/\text{GeV}]$
$\langle \rangle_t :$	Mittelwert der Größe über dem gesamten Umfang
$\rho :$	Ablenkradius in den Magneten
$\beta_x :$	Betafunktion in X-(horizontaler)Richtung
$\eta_x :$	Dispersionsfunktion in X-Richtung
α und $\gamma :$	Twistparameter
D:	Dämpfungszahl
$J_x :$	Dämpfungsfunktion in X-Richtung
$J_y :$	Dämpfungsfunktion in Y-(vertikaler)Richtung
$J_s :$	Dämpfungsfunktion in S-(longitudinaler)Richtung
' :	Ableitung der Funktion nach s

Für ein isomagnetisches Feld ($\rho = \text{const}$) vereinfacht sich die Formel zur Berechnung der Emittanz zu:

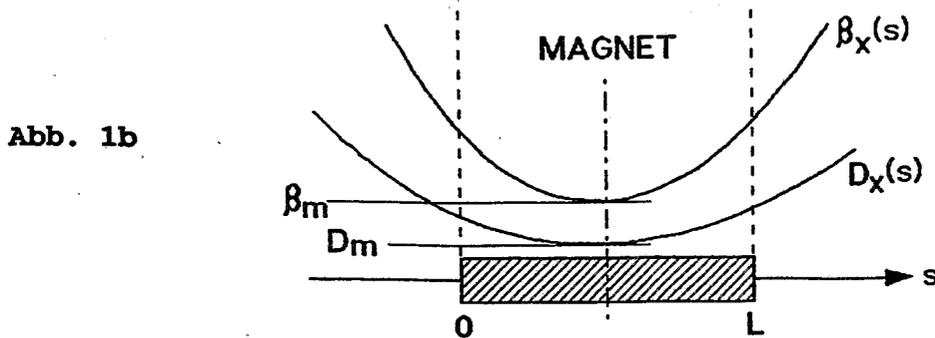
$$\epsilon_x = Cq \cdot \gamma^2 \frac{1}{J_x} \cdot \frac{1}{\phi \cdot L} \int_0^L [\gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_x' + \beta_x \eta_x'^2] ds \quad (7)$$

Hieraus folgt, daß die Emittanz proportional zum Quadrat der Energie ($\epsilon_x \approx E^2$) und für nicht zu große Ablenkwinkel proportional der dritten Potenz des Ablenkwinkels ($\epsilon \approx \phi^3$) ist [5]. Bei vorgegebener Energie wird die Emittanz in erster Näherung durch den Ablenkwinkel ϕ der Magnete bestimmt. Minimale Werte der Emittanz werden erreicht, wenn die H-Funktion [siehe Gl. (4)] in den Magneten möglichst kleine Werte annimmt. Hierzu müssen die Produkte aus den $\beta_x(s)$ - und $\eta_x(s)$ -Funktionen sowie ihren Ableitungen einen möglichst kleinen Beitrag zur H-Funktion liefern. Dies ist dann erfüllt, wenn $\beta_x(s)$ und $\eta_x(s)$ in den Magneten jeweils ein Minimum durchlaufen.



$$s^* = 3L/8, \quad \beta_m = \sqrt{\frac{3}{320}} \cdot L \quad (8)$$

$$\epsilon_{x0} = Cq \cdot \gamma_0^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \phi^3 \cdot \frac{1}{4\sqrt{15}} \quad (9)$$



$$\beta_m = \frac{1}{2\sqrt{15}} \cdot L, \quad \eta_m = \frac{1}{24\rho} \cdot L^2 \quad (10)$$

$$\epsilon_{x0} = Cq \cdot \gamma_0^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \phi^3 \cdot \frac{1}{3 \cdot 4\sqrt{15}} \quad (11)$$

Abb. 1: Verläufe der Beta- und Dispersionsfunktion in einem Magneten, die zu einer minimalen Emittanz führen.

Zur Verdeutlichung sind in der Abb. 1 zwei mögliche Fälle dargestellt. Im Fall a.) handelt es sich um den Eingangs- und Ausgangsmagneten der DBA-Struktur und im Fall b.) um den mittleren Magneten der TBA-Struktur. Theoretische Verläufe der $\beta_x(s)$ - und der $\eta_x(s)$ -Funktion, wie sie in der Abb. 1.a) und 1.b) wiedergegeben sind, führen zu den minimalen Emittanzen:

$$\text{Abb. 1.a): } \mathcal{E}_{x0} = Cq \cdot \gamma^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \phi^3 / [4\sqrt{15}] \quad (12)$$

$$\text{Abb. 1.b): } \mathcal{E}_{x0} = Cq \cdot \gamma^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \phi^3 / [12\sqrt{15}] \quad (13)$$

Bei gleichem Ablenkwinkel ϕ ist die Emittanz im Falle 1.b) um den Faktor 3 kleiner als im Falle 1.a).

Die TBA-Struktur ist aufgebaut aus einem mittleren Magneten nach Abb. 1.b und den äußeren nach Abb. 1.a. Bei gleichem Ablenkwinkel ϕ hat die TBA-Struktur (bei den hier vorgegebenen theoretischen Verläufen der $\beta_x(s)$ - und der $\eta_x(s)$ -Funktion) bezüglich der Emittanz nur einen Vorteil um den Faktor 1,3. In der Realität sind die Verhältnisse jedoch viel ungünstiger, weil die in Abb. 1 geforderten Verläufe der $\beta_x(s)$ - und der $\eta_x(s)$ -Funktion nur schwer erreichbar sind.

Die Idee der für den Speicherring ROSY vorgeschlagenen Magnetstruktur beruht darauf, den Vorteil der Emittanz im Fall Abb. 1.b) (Faktor 3) auszunutzen. Hierzu wird eine Magnetstruktur aus drei Einheitszellen nach Abb. 1.b. und zwei Anpassungszellen aufgebaut. Die Anpassungszellen haben die Aufgabe, die Verläufe der β_x - und η_x -Funktionen der Einheitszellen an die gewünschten Bedingungen am Eingang und Ausgang des Achromaten anzupassen. Es sind die Bedingungen, die zu einer optimalen Brillanz der Undulatoren und Wiggler führen. Hierzu werden am Ort der ID's ganz bestimmte Werte der $\beta_x(s)$ - bzw $\beta_y(s)$ -Funktion gefordert, aber insbesondere muß die Dispersionsfunktion $\eta_x(s)$ in diesem Bereich null sein. Der Sachverhalt ist in Abb. 2 wiedergegeben. Dargestellt ist der Verlauf der Maschinenfunktionen in der Einheitszelle und der gewünschte Verlauf der Dispersionsfunktion im Bereich der ID's. Es ist aus Abb. 2 ersichtlich, daß die Anpassung mit einem halben Magneten der Einheitszelle viel näher an den Anpassungsbedingungen liegt als mit einem ganzen Magneten. Am Speicherring Delta [10] wurde diese Art der Anpassung bereits durchgeführt. Ein Achromat dieser modifizierten FODO-Struktur

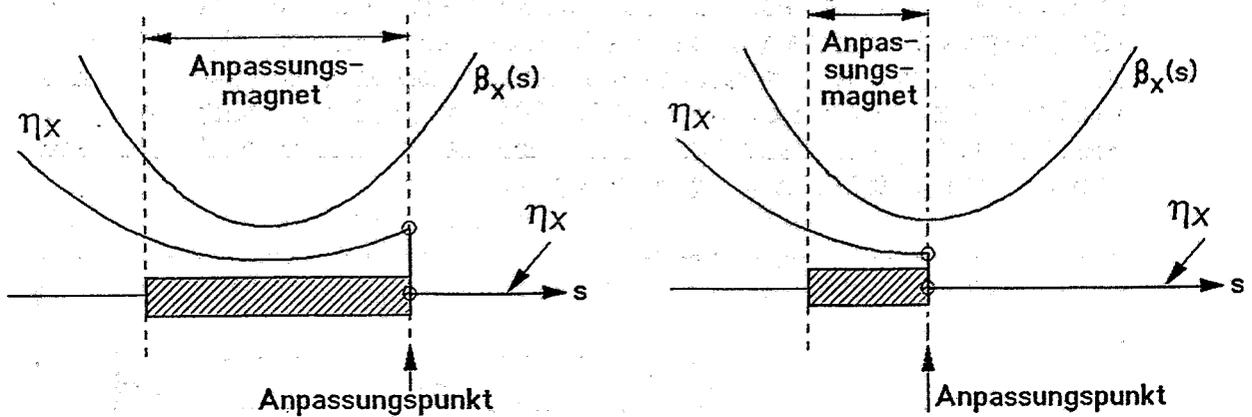


Abb. 2: Verlauf der $\beta_x(s)$ -Funktionen bei der Anpassung an die Bedingungen am Ort der Undulatoren und Wiggler

besteht somit aus drei Einheitszellen und zwei Anpassungszellen. Die Ablenkung in einer Einheitszelle beträgt ϕ und die in der Anpassungszelle $\phi/2$.

Durch die Anpassung an die Bedingungen in den sogenannten "geraden Stücken" wird bei der TBA-Struktur nie die minimale Emittanz erreicht, weil die idealen Verläufe in den Anpassungsmagneten nicht gegeben sind. Durch die Anpassung mit einem Magneten vom Winkel $\phi/2$ werden die Emittanzvergrößerungen durch diesen um den Faktor 8 verkleinert.

2.2 Aufbau und Eigenschaften der Einheitszelle

Zur Erreichung des gewünschten Verlaufes der $\beta_x(s)$ - und der $\eta_x(s)$ - Funktion in dem Ablenkmagneten muß in der Einheitszelle ein magnetisches Element mit einer fokussierenden und eins mit einer defokussierenden Komponente eingebaut werden. Untersuchungen von Einheitszellen mit einem Doublet-System sind für den Speicherring Delta [11] durchgeführt worden. Ein sehr einfacher Aufbau der Einheitszelle ergibt sich, wenn die Defokussierung des Elektronenstrahles in den Magneten verlegt wird. Die Einheitszelle besteht dann, wie in Abb. 3 wiedergegeben, nur aus zwei magnetischen Elementen: dem Quadrupol und dem Ablenkmagneten.

Durch die Einführung eines Gradienten in den Ablenkmagneten wird die Dämpfungszahl $J_x > 1$ (siehe Gl. (3), (4)) und führt

zu einer zusätzlichen Verkleinerung der Emittanz. Die Dämpfungszahl in longitudinale Richtung nimmt jedoch ab: $J_s = 2 + \delta$. Eine entsprechende Struktur wurde erstmals für den Speicherring LISA in Bonn [12], [9] erarbeitet. Aufgrund der positiven Ergebnisse wird diese Magnetstruktur auch für den Speicherring ROSY I vorgeschlagen.

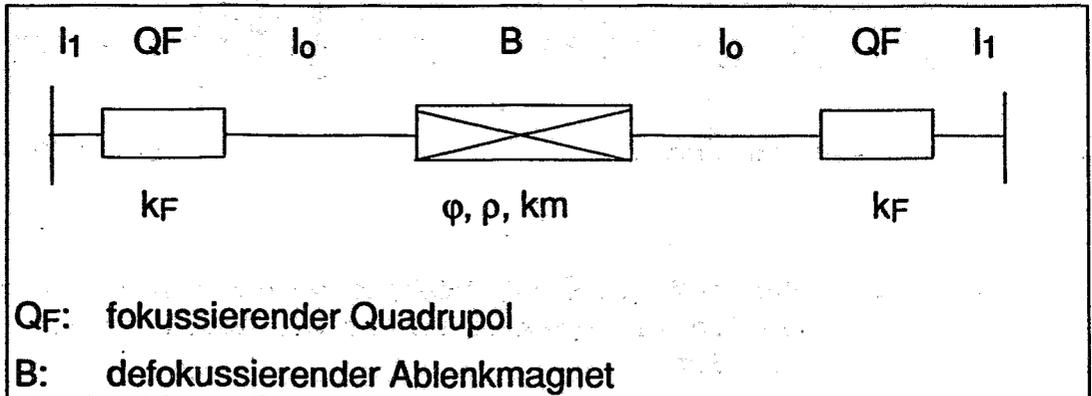


Abb. 3: Magnetstruktur einer Einheitszelle des Speicherringes

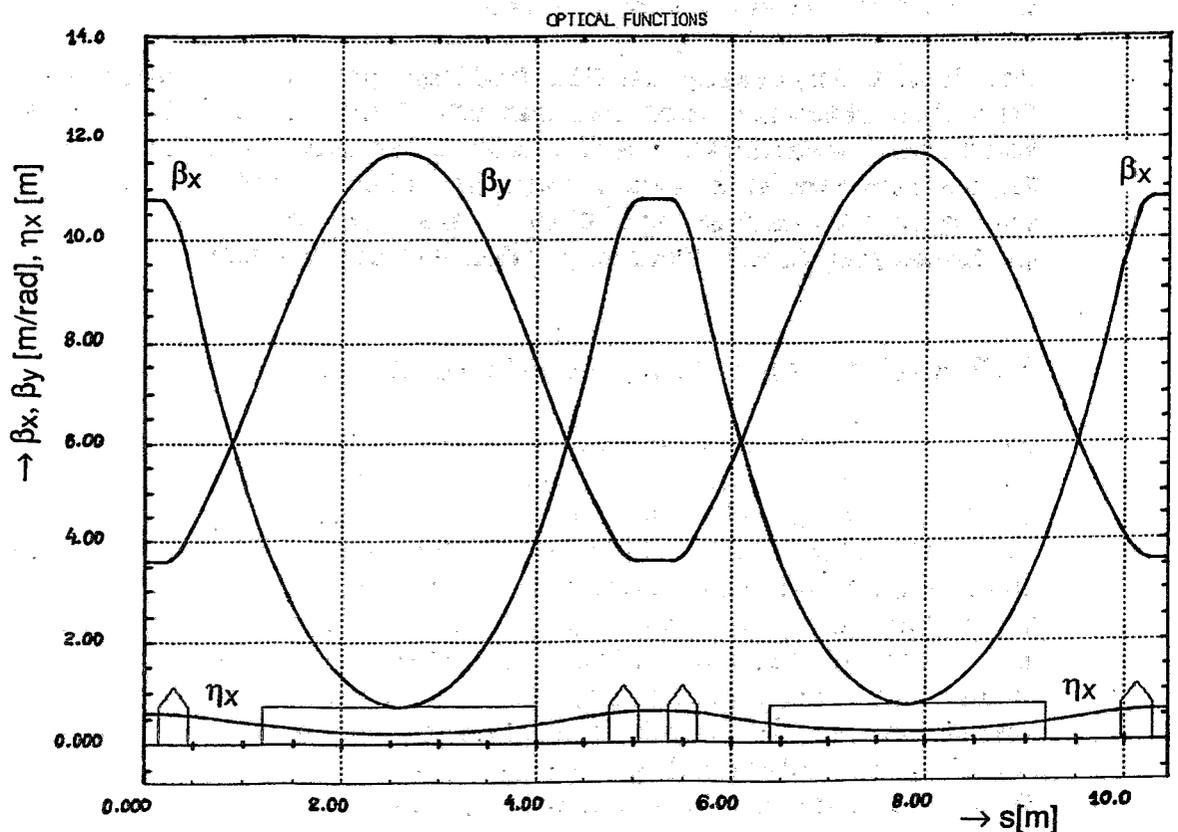


Abb. 4: Verlauf der Maschinenfunktionen β_x , β_y und η_x in zwei Einheitszellen des Achromaten vom Speicherring ROSY I.

Das Verhalten der Einheitszelle wird durch die Verläufe der Maschinenfunktionen $\beta_x(s)$, $\beta_y(s)$ und $\eta_x(s)$ bestimmt. In Abb. 4 ist der Verlauf dieser Funktionen innerhalb von zwei Einheitszellen wiedergegeben. Weiterhin sind für die Beschreibung der Einheitszelle Parameter von Bedeutung, die sich aus dem Verlauf der Maschinenfunktionen errechnen: Emittanz ϵ_x , Dämpfungszahl D , Arbeitspunkte Q_x und Q_y sowie die Chromatizitäten ξ_x und ξ_y . Der Verlauf dieser Funktionen ist in Abb. 5 und 6 dargestellt und zwar in Abhängigkeit der Stärke k_f des fokussierenden Quadrupols. In den Abbildungen sind als Parameter gewählt: der Gradient im defokussierenden Magneten k_m und der Abstand l_0 zwischen Quadrupol und Ablenkmagnet (siehe Abb. 3). Die in den Abb. 5 und 6 aufgetragenen Größen wurden für einen Speicherring bestehend aus 16 Einheitszellen berechnet.

Die Emittanz durchläuft bei einer bestimmten Quadrupolstärke k_f ein Minimum und steigt nach dem Durchlaufen des Minimums steil an. Das Minimum ist dabei nicht abhängig von dem Gradienten im Ablenkmagneten (Abb. 5.a). Wird der Abstand zwischen Magnet und Quadrupol verändert, so verschiebt sich selbstverständlich die Lage des Minimums. Die Emittanz an der Stelle des Minimums ändert sich jedoch nicht (Abb. 5.b). Bei hohen Quadrupolstärken k_f ergeben sich keine Lösungen, weil die β_x -Funktion sehr große Werte einnimmt, und somit ist der Stabilitätsbereich der Einheitszelle bei zu hohen k_f -Werten eingeschränkt. ($k_f > 1.62 \text{ m}^{-2}$)

Die Synchrotronschwingungen sind nicht mehr gedämpft, und der gespeicherte Strahl geht verloren, wenn die Dämpfungszahl D (Abb. 5.c und 5.d) kleiner als -2.0 wird. Für die Einheitszelle von ROSY folgt hierdurch ein stabiler Bereich für Quadrupolstärken $1.2 \leq k_f \leq 1.6$. Der stabile Bereich ist im geringen Umfang eine Funktion des Abstandes l_0 zwischen Magnet und Quadrupol und dem Gradienten k_m im Magneten.

Der Arbeitspunkt der Einheitszelle in X-Richtung ist in erster Näherung durch k_f und in Y-Richtung durch den Gradienten k_m im Ablenkmagneten bestimmt. Eine Abstandsveränderung hat eine Auswirkung auf den Arbeitspunkt in beiden Richtungen (Abb. 6.a und 6.b). Auffallend bei diesen Darstellungen ist, daß sich mit dem Abstand l_0 sowohl die Lage der minimalen Emittanz als auch der Q_x -Wert ändert. Die

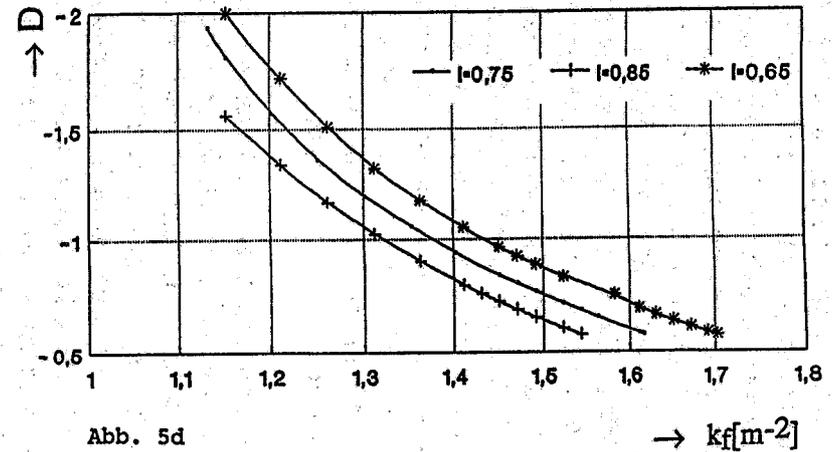
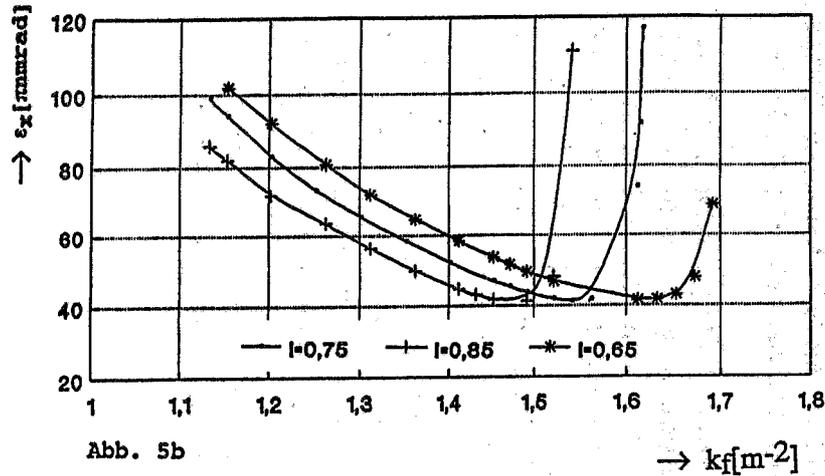
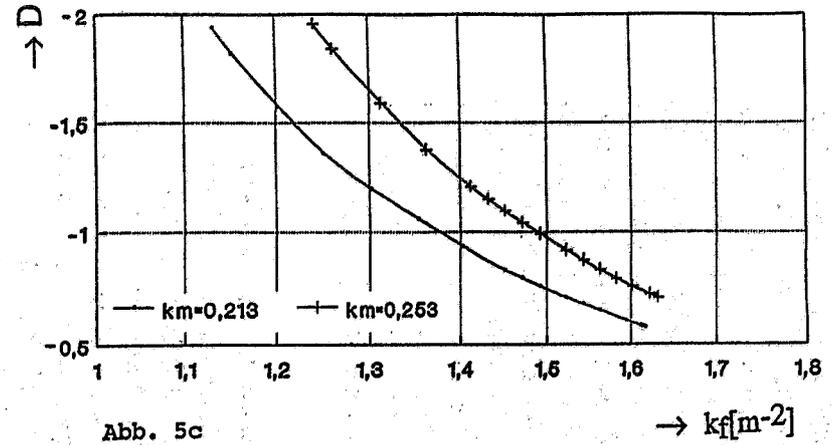
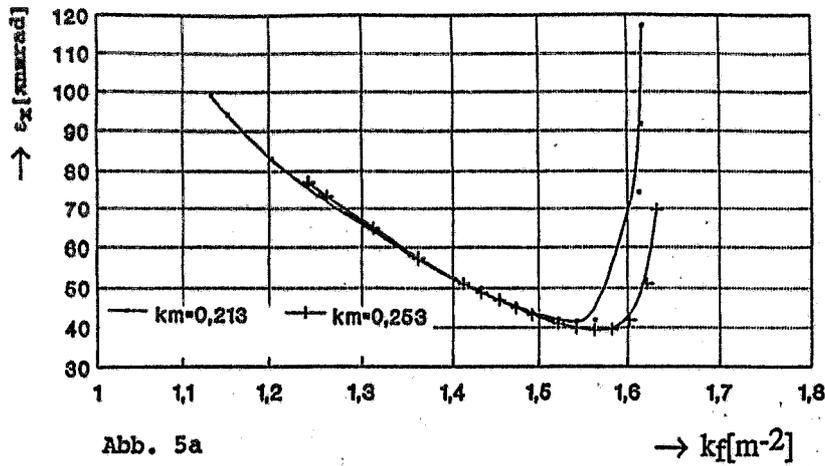


Abb. 5.: Abhängigkeit der Emittanz und der Entdämpfungskonstanten D in der Einheitszelle von der Stärke des fokussierenden Quadrupols k_f . Als Parameter sind gewählt: Quadrupolstärke k_m im Ablenkungsmagneten und Abstand l_0 zwischen Quadrupol und Ablenkungsmagnet.

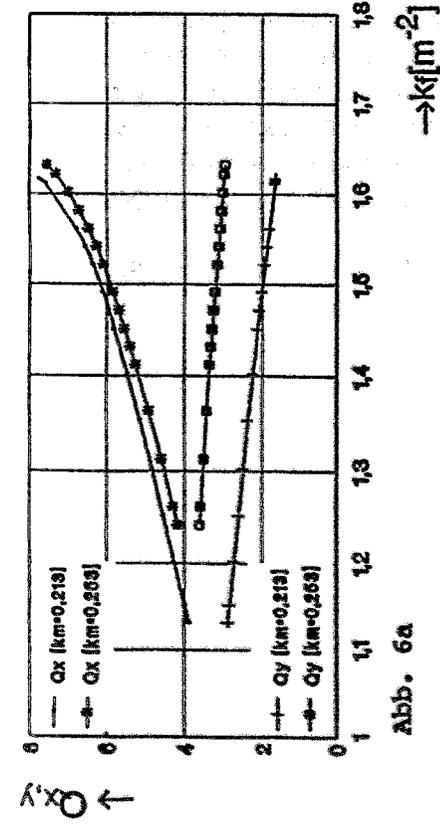


Abb. 6a

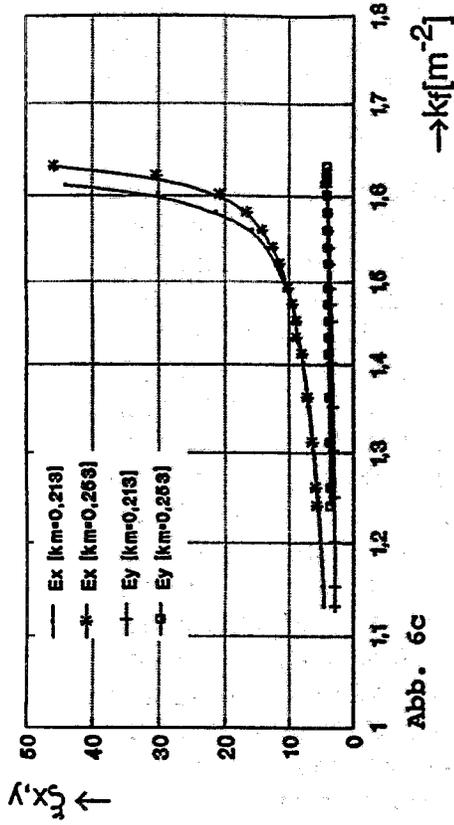


Abb. 6c

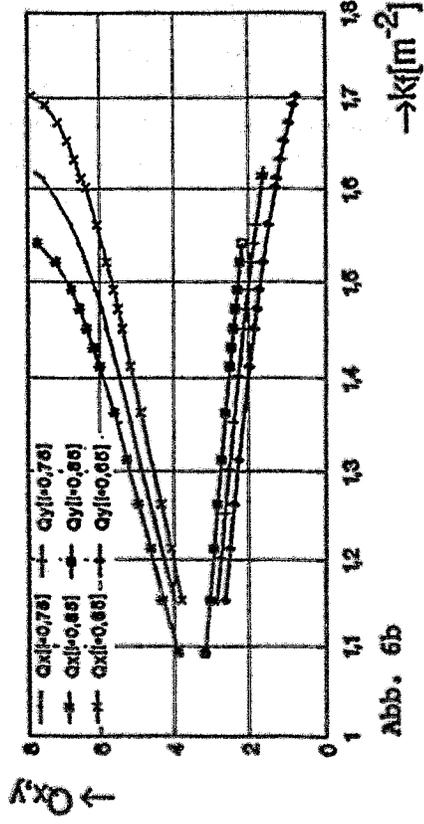


Abb. 6b

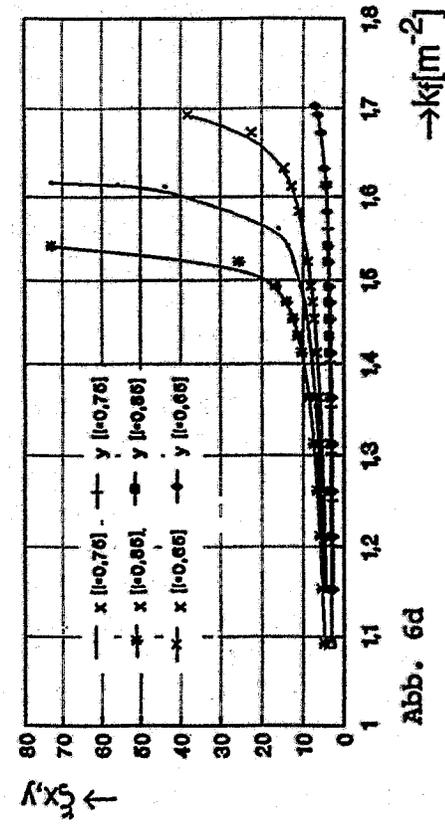


Abb. 6d

Abb. 6: Abhängigkeit der Arbeitspunkte O_x und O_z sowie der Chromatizität ξ_x und ξ_y in der Einheitszelle von der Stärke des fokussierenden Quadrupols k . Als Parameter sind gewählt: Quadrupolstärke k_m im Ablenkmagneten und Abstand l_0 zwischen Quadrupol und Ablenkmagneten.

Auswertung ergibt, daß zur minimalen Emittanz immer derselbe Q_x -Wert gehört. Eine Längenveränderung von l_0 führt bei gleicher Emittanz zu einer Arbeitspunktverschiebung in Y-Richtung.

Die Chromatizität in X-Richtung ist bestimmt durch die Stärke des fokussierenden Quadrupols und die in Y-Richtung durch den Gradienten im defokussierenden Ablenkmagneten (siehe Abb. 6.a u. b). Während die Chromatizität in Y-Richtung unabhängig von k_f ist, wird ξ_x mit zunehmenden k_f -Werten nach dem Durchlaufen des Minimums der Emittanz sehr groß. (siehe Abb. 6.a u. b). Für k_f -Werte, die zu einer Emittanz $\epsilon > \epsilon_{\min}$ führen, ändert sich die Chromatizität ξ_x nur unwesentlich. In diesem Bereich haben ξ_x und ξ_y in etwa gleiche Werte. Für die minimalen Emittanzen ergeben sich Chromatizitäten um den Faktor 50, die für Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation typisch sind. Diese sollten noch zu vernünftigen dynamischen Aperturen führen. Eine detaillierte Auswertung zur Chromatizität ergibt, daß in Abhängigkeit vom Abstand l_0 zwischen Quadrupol und Magnet zu jeder minimalen Emittanz die selbe Chromatizität ξ_x gehört. Mit der Variation der Länge l_0 kann lediglich die Chromatizität in Y-Richtung (bei beibehaltener Emittanz) verändert werden.

Die magnetische Auslegung einer Einheitszelle ist in Abb. 9 wiedergegeben. Die für die Chromatizitätskompensation notwendigen Sextupole werden links und rechts vom Ablenkmagneten (S_y) bzw. am Anfang und Ende der Einheitszelle (S_h) positioniert. Dies sind optimale Positionen, denn die Differenz zwischen den Amplitudenfunktionen in X- und Y-Richtung ist an diesen Stellen maximal. (siehe Abb. 4)

Die Abhängigkeiten der Sextupolstärken zur Durchführung der Chromatizitätskompensation sind in Abb. 7 wiedergegeben.

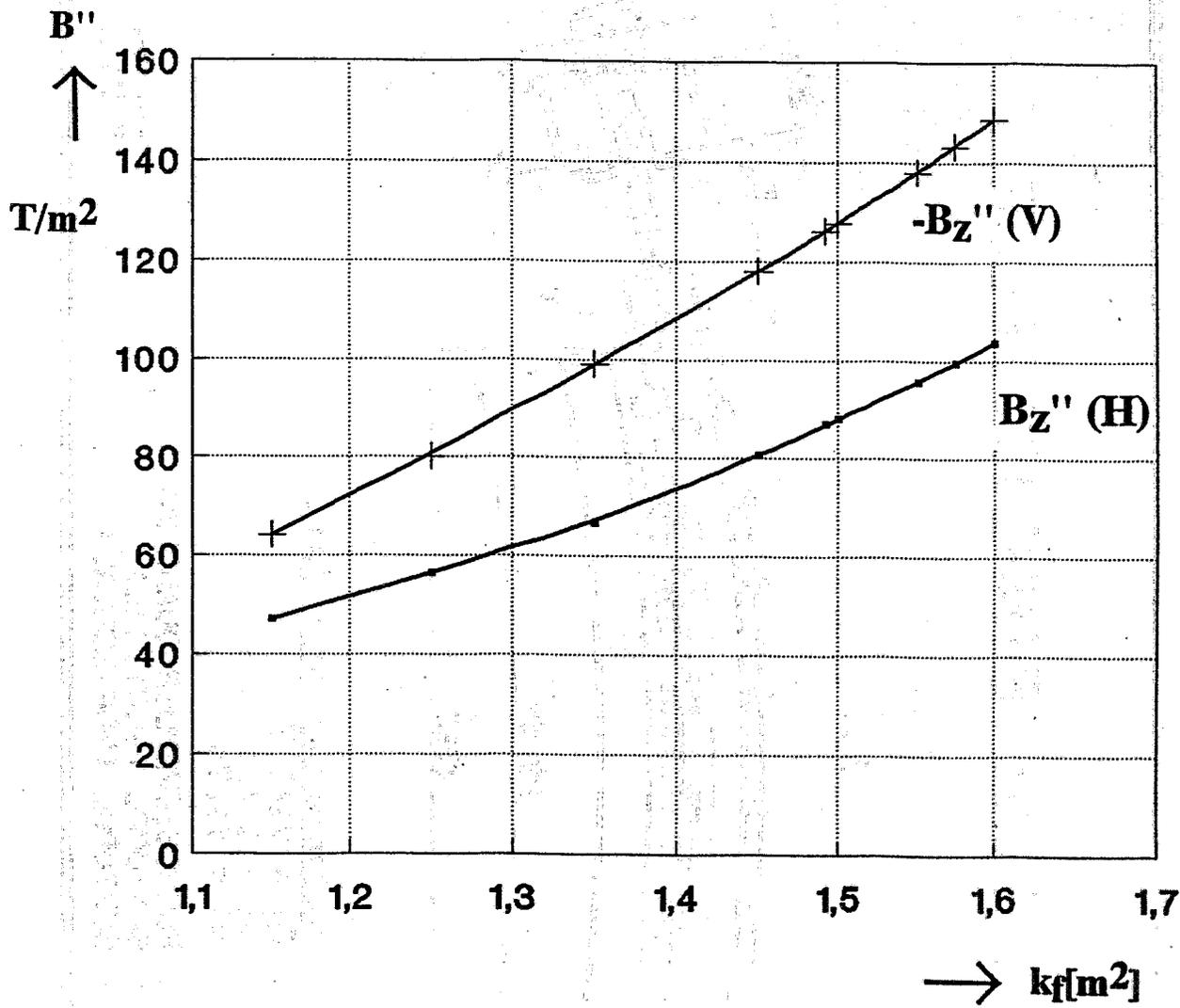
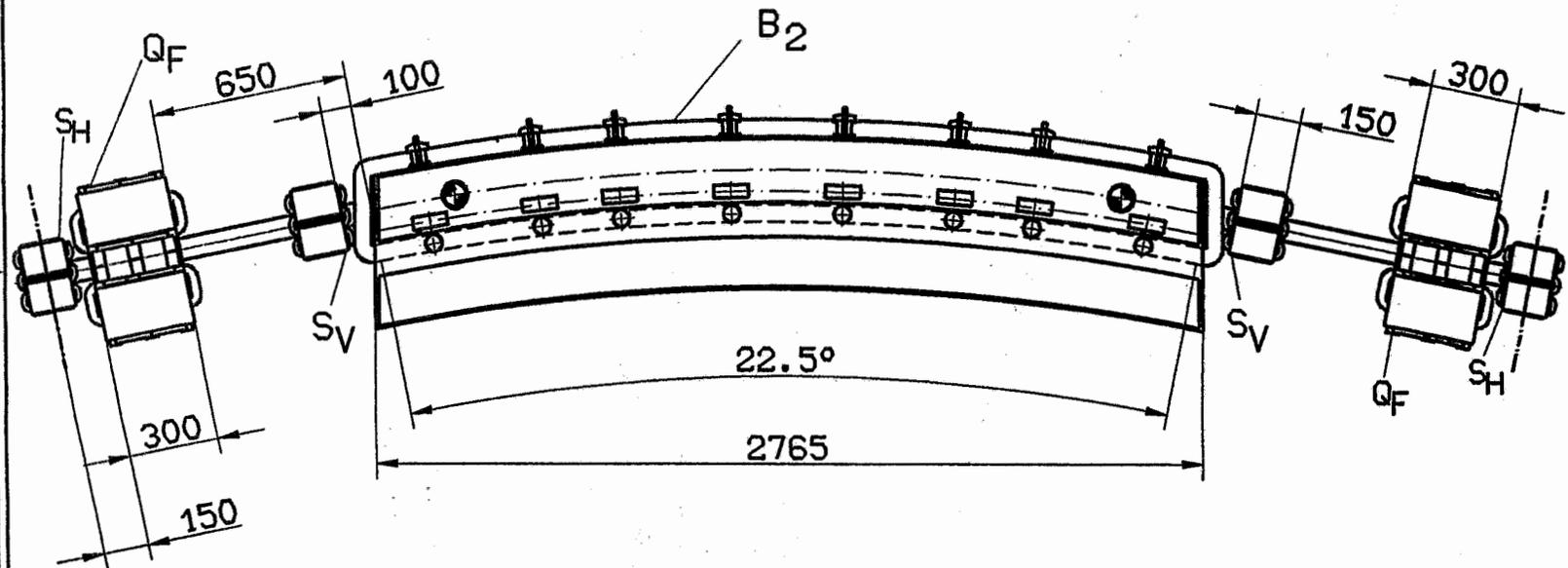


Abb. 7: Stärken der Sextupole für die Chromatizitätskompensation in der Einheitszelle.

ROSY I 3.0 GeV: EINHEITSZELLE



II-14

B_2 : ABLENKMAGNET 22.5 GRAD
 $R_0 = 7147.7$
 $B_0 = 1.4 \text{ T}$
 $N_D = 11.75$

Q_F : FOKUSSIERENDER QUADRUPOLE
 S_V : SEXTUPOL (VERTIKAL)
 S_H : SEXTUPOL (HORIZONTAL)

FZR

FHO

Abb. 9: Magnetstruktur innerhalb einer Einheitszelle des Speicherringes ROSY I

3. ACHROMAT DES SPEICHERRINGES ROSY I

Das Verhalten des Speicherringes soll durch die Einheitszellen bestimmt werden. Bereiche, die zu einer Abweichung führen, sind die Anpassungszellen, die benötigt werden, um die Maschinenfunktionen der Einheitszelle an die gewünschten Bedingungen in den langen geraden Stücken anzupassen. Um den Einfluß der Anpassungszellen relativ gering zu halten und die Struktur der Einheitszelle dem Speicherring aufzuprägen, wird ein Achromat aus drei Einheitszellen und zwei Anpassungszellen aufgebaut.

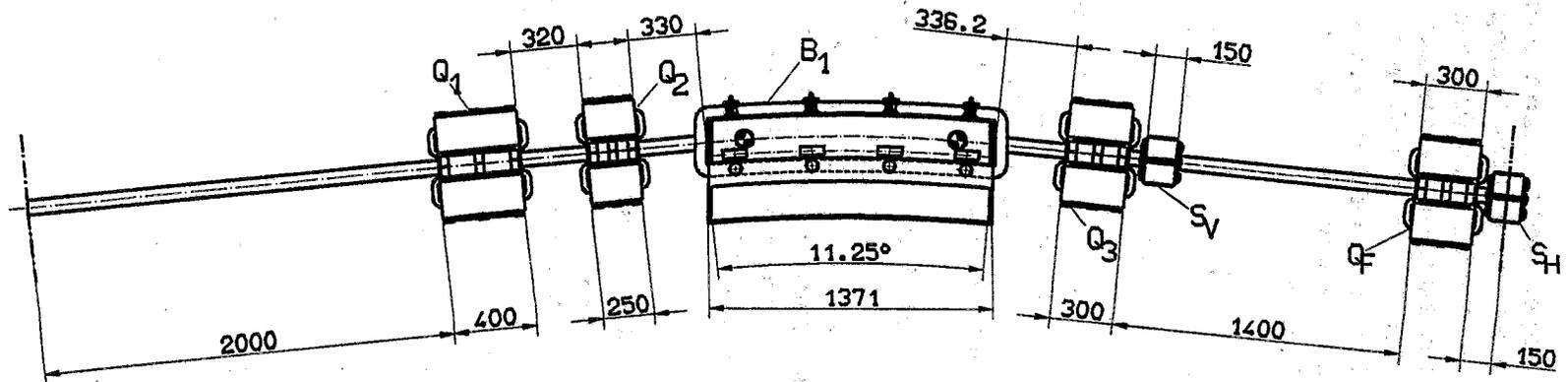
Für die Anpassung der $\beta_x(s)$, $\beta_y(s)$ - und der $\eta(s)$ -Funktion an die gewünschten Werte am Ort der ID's werden insgesamt 4 Quadrupole benötigt. Zwei in den geraden Strecken zur Anpassung der Betatronfunktion und zwei zwischen der Einheitszelle und dem kurzen Ablenkmagneten zur Anpassung der Dispersionsfunktion. Die Anordnung der Magnete in den Anpassungszellen und im Bereich der Wiggler sind in der Abbildung 10 dargestellt. Für die Wiggler steht in den langen geraden Stücken eine Einbaulänge von maximal 4m zur Verfügung.

Der sich aus den Einheits- und den Anpassungszellen ergebende Achromat und die aus zwei Achromaten zusammengesetzte Zelle des Speicherringes sind in den Abbildungen 11 und 12 wiedergegeben. Der mittlere Durchmesser des Speicherringes ROSY I beträgt 35m. Der Speicherring mit umliegender Experimentierhalle ist in Abb. 13 dargestellt. Für die Experimentierhalle ergibt sich ein Durchmesser von etwa 100m.

Wird im Speicherring ROSY I eine gerade Strecke für die Injektion und eine für die Hochfrequenz-Cavities vorgesehen, so verbleiben noch 2 weitere für den Einbau längerer Wiggler. Entsprechend Abb. 10 erlaubt es die vorgeschlagene Magnetstruktur im Bereich der Anpassungszellen Mini-Wiggler mit einer Länge von etwa 1 - 1,2 m zwischen den beiden Quadrupolen einzubauen. Insgesamt stehen sechs solche Einbauplätze zur Verfügung. Weiterhin ist es sinnvoll, an allen 20 vorhandenen Magneten Strahlrohre für die Nutzung der Synchrotronstrahlung anzubringen.

Die Verläufe der $\beta_x(s)$, $\beta_y(s)$ - und $\eta_x(s)$ -Funktion in einem Achromaten für diesen Fall ist in Abb. 10 dargestellt. Bei einer Emittanz von $\epsilon_x = 40 \pi \text{nmrad}$ und $\epsilon_y = 4.0 \pi \text{nmrad}$ ergeben sich in den Magneten Querschnitte des gespeicherten Elektronenstrahls von $\sigma_x \approx \sigma_y \approx 0,20 \text{ mm} \approx 200 \mu\text{m}$.

ROSY I 3.0 GeV: ANPASSUNGSZELLE



B_1 : ABLENKMAGNET 11.25 GRAD
 $R_0 = 7147.7$
 $B_0 = 1.4 \text{ T}$
 $N_D = 11.75$

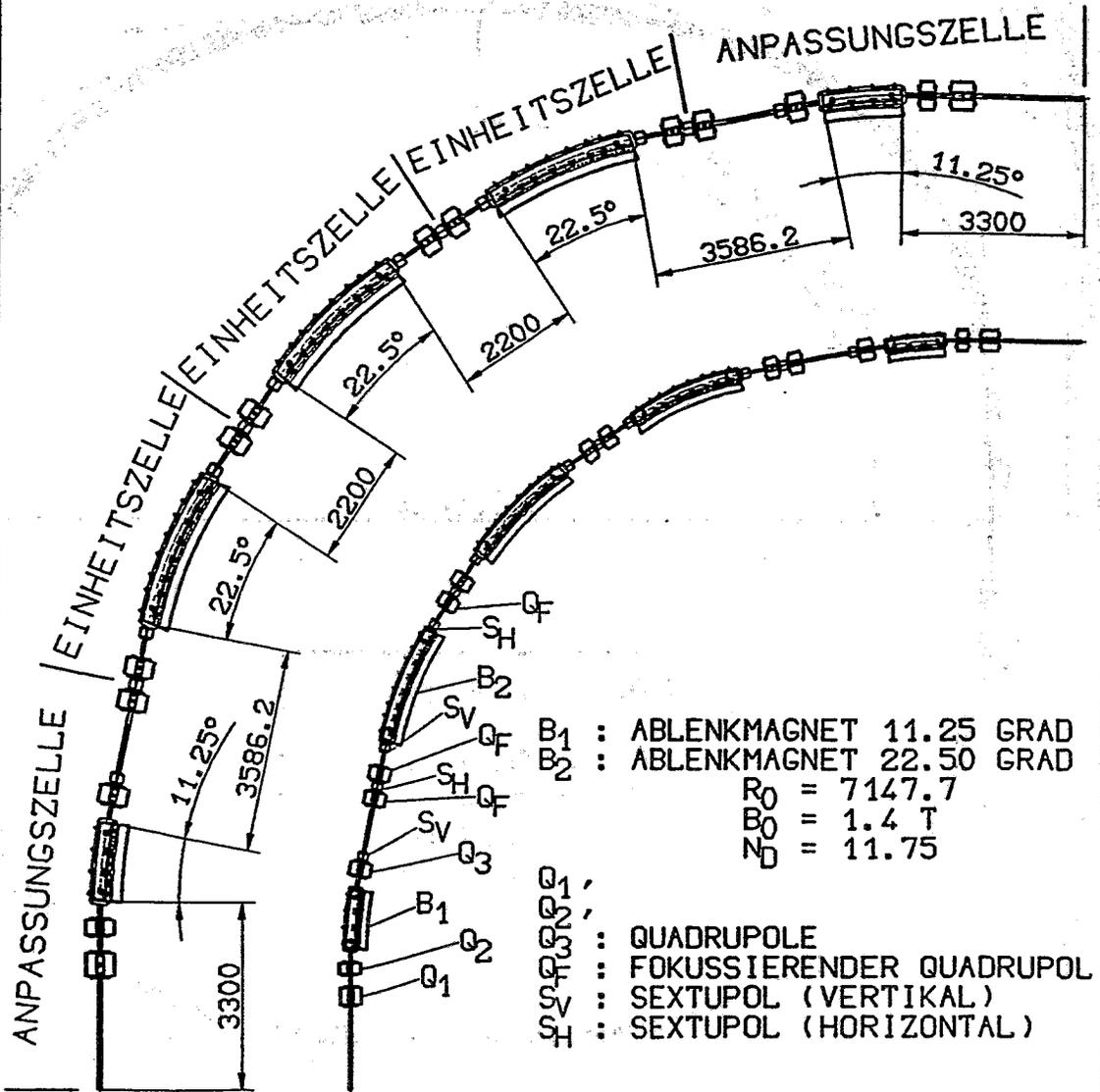
Q_1, Q_2, Q_3 : QUADRUPOLE
 Q_F : FOKUSSIERENDER QUADRUPOLE
 S_V : SEXTUPOL (VERTIKAL)
 S_H : SEXTUPOL (HORIZONTAL)

FZR

FHO

Abb. 10: Magnetstruktur der Anpassungszellen des Speicherringes ROSY I

ROSY I 3.0 GeV ACHROMAT



FZR

FHO

Abb. 11: Magnetstruktur eines Achromaten des Booster-Speicherringes ROSY I

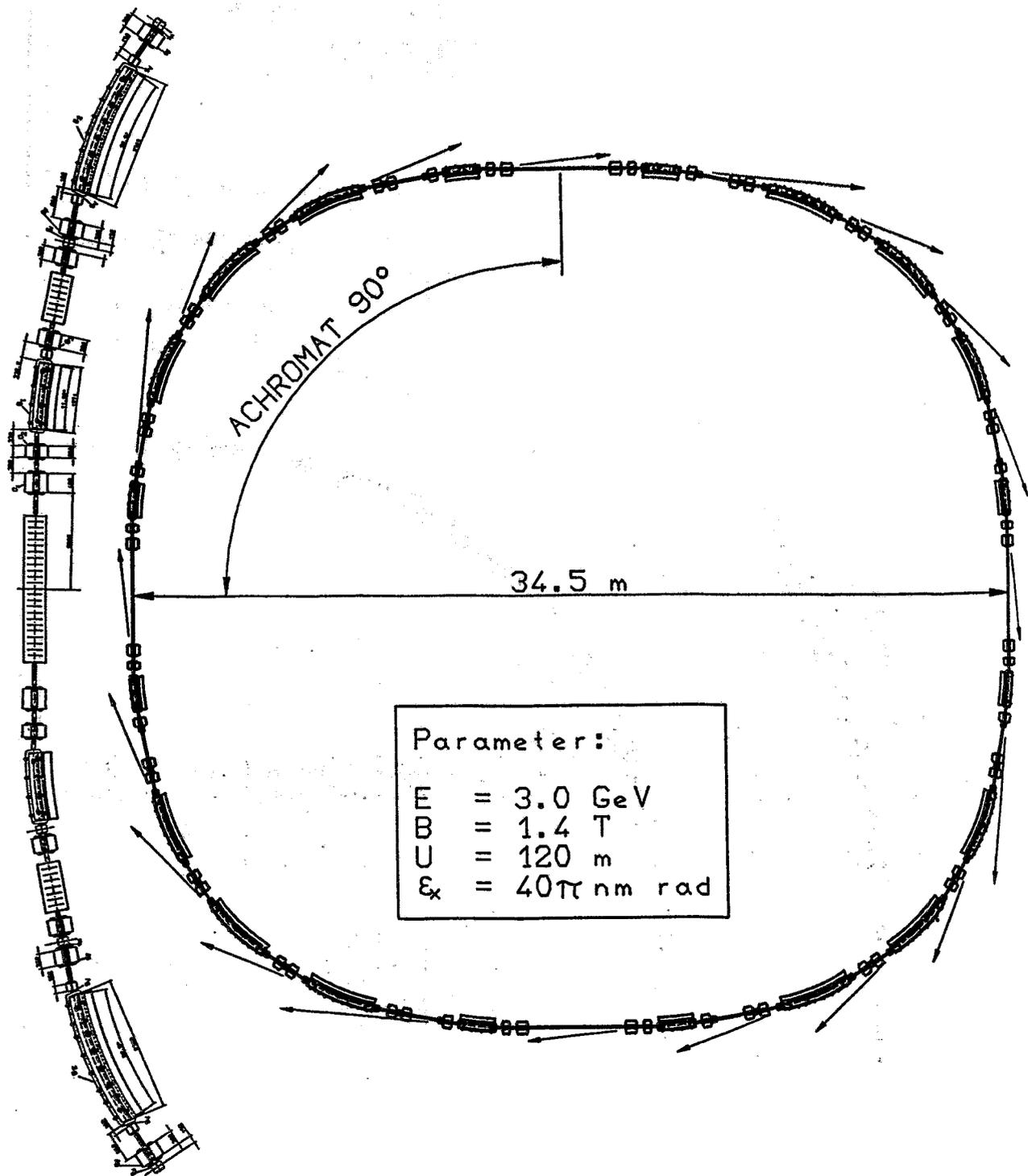


Abb. 12: Aufbau Magnetstruktur des Speicherringes ROSY I

ROSY I

Booster Speicherring $E = 3.0 \text{ GeV}$

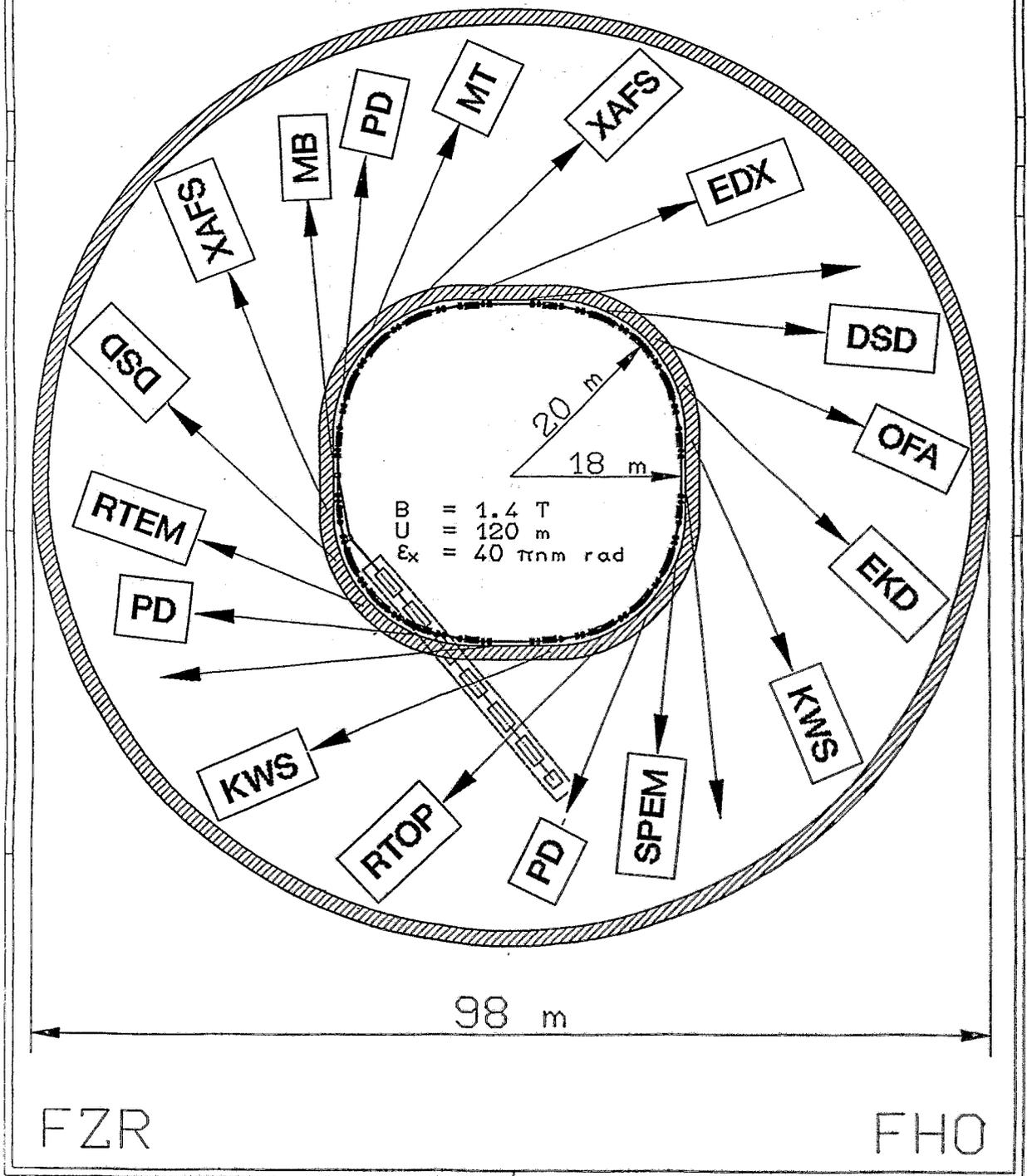


Abb. 13: Die Speicherringanlage ROSY I mit Experimentierhalle und 300 MeV-Linearbeschleuniger als Injektor

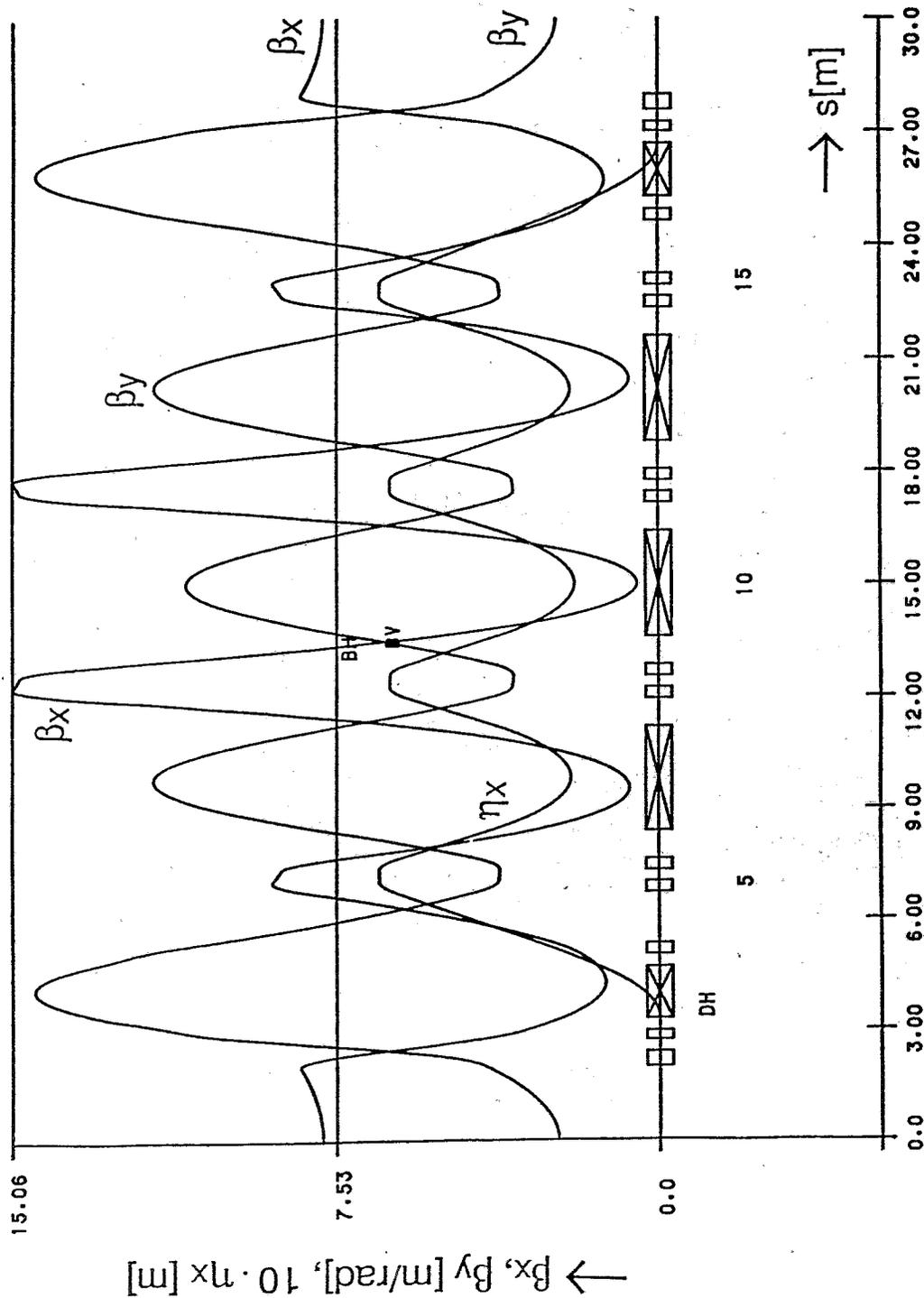


Abb. 14: Verlauf der Beta- und Dispersionsfunktion in einem Achromaten des Speicherringes ROSY I

Magnetstruktur	MBA
Max. Elektronenenergie (GeV)	3.2
Nominelle Elektronenenergie (GeV)	3.0
Injektionsenergie (MeV)	300
Umfang (m)	120,0
Periodizität	4
Max. Strom (Multibunch) (mA)	100
Strahllebensdauer (h)	4
Natürl. Emittanz (π nmrad)	40
Arbeitspunkte Q_x/Q_z	7.618 / 3.255
Natürl. Chromatizität ξ_x / ξ_y	-13.2 / -5.6
Momentum Compaction Factor	0.011
Relative Energieunschärfe (%)	0.11
$\beta_x(\max) / \beta_x(\min)$ [m/rad]	15.0 / 0.50
$\beta_z(\max) / \beta_z(\min)$ [m/rad]	13.5 / 3.42
β_x/β_z (Mitte des geraden Stückes)	7.86 / 2.39
Max. Dispersionsfunktion (m)	0,65
Dispersionsfunktion im geraden Stück (m)	0,0
Anzahl Dipolmagnete 11.25 / 22.5	8 / 12
Ablenkradius (m)	7.14771
B_{\max} auf Orbit	1.40
Gradient im Dipol (T/m)	2.3016
Anzahl der Quadrupole	56
Max. Gradient (T/m) / Stärke (m^{-2})	20.0 / 2.00
Anzahl Sextupole	48
Diff. Gradient g' (T/m ²)/Stärke (m^{-3})	500 / 50

Tab. 1: Elektronenoptische Parameter des Speicherringes ROSY I.

Mit der vorgeschlagenen Magnetstruktur wird bei einer Energie von $E = 3$ GeV und einem Kopplungsfaktor von $k = 0.1$ eine Emittanz von $\epsilon_x = 40 \pi \text{nmrad}$ erreicht. Dies ist ein relativ kleiner Wert. Die Chromatizitäten liegen in der Größenordnung von -13 bzw. -5.6 . Diese Werte sind ebenfalls relativ klein. Der Arbeitspunkt des Gesamtringes liegt bei $Q_x = 7.618$ und $Q_y = 3.255$, der einer Einheitszelle bei $Q_x = 1.905$ und $Q_y = 0.814$. Dies ist relativ nahe an der Resonanzlinie $Q_x = 2.0$. Die Rechnungen zur dynamischen Apertur zeigen, daß sich bei diesem Arbeitspunkt eine relativ große dynamische Apertur ergibt. Bezüglich der Einstellung des Arbeitspunktes müssen weitere Berechnungen durchgeführt werden.

Das Resonanzdiagramm des Ringes und der Einheitszelle ist in Abb. 15 wiedergegeben. Der Arbeitspunkt des Ringes liegt zwar in der Nachbarschaft einer Resonanzlinie 6. Ordnung, die sich ergebenden dynamischen Aperturen von $|\Delta x| \leq 40$ mm und $|\Delta y| \leq 30$ mm sind aber ausreichend. Die dynamische Apertur ist in Abb. 17 und die Verschiebung der Arbeitspunkte bei Energieänderungen sind in Abb. 16 dargestellt. Diese Rechnungen wurden sowohl mit RACETRACK [21], als auch mit BETA [22] durchgeführt. Die elektronenoptischen Parameter des Booster-Speicherringes sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Insgesamt muß diese Magnetstruktur noch weiter optimiert werden, um Emittanzen in der Größenordnung von $20 - 30 \pi \text{nmrad}$ zu erreichen.

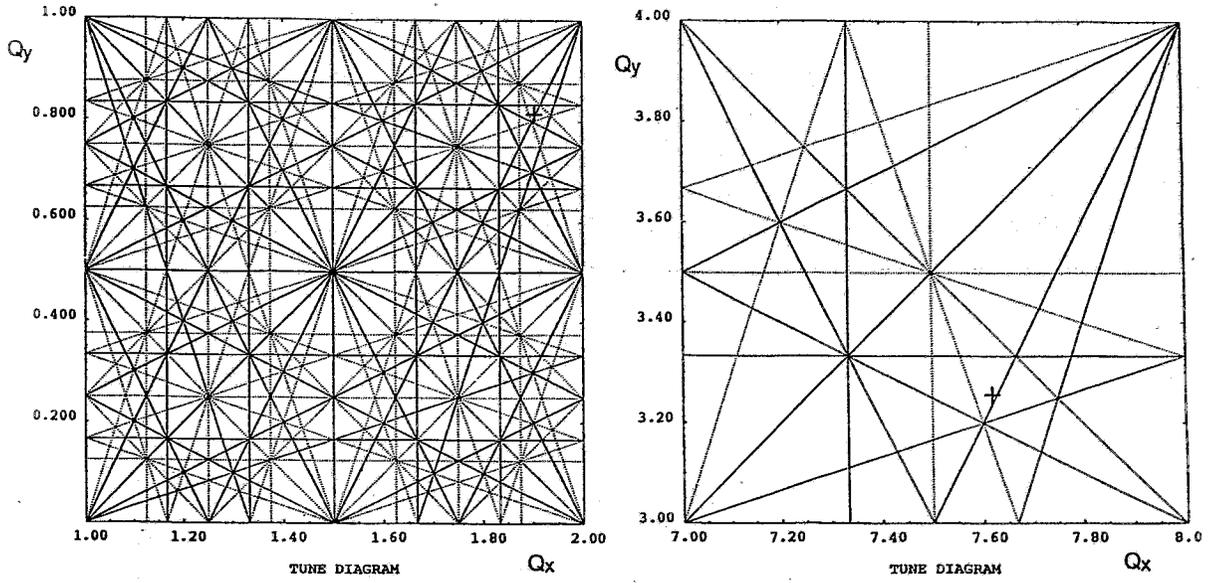


Abb. 15: Resonanzdiagramm des Speicherringes ROSY I und des Achromaten mit Arbeitspunkt

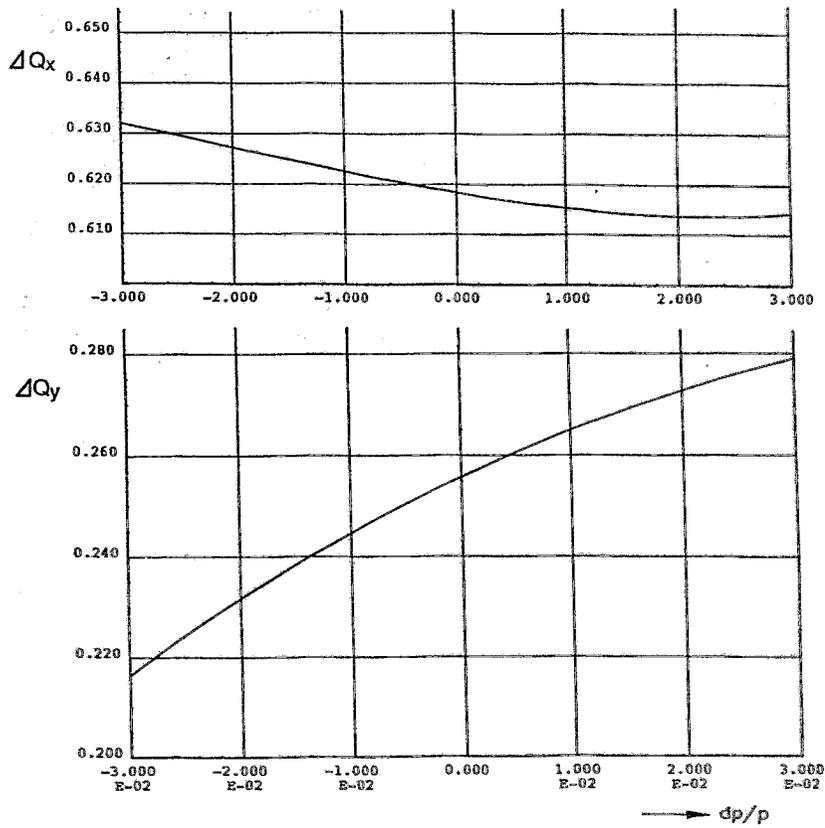


Abb. 16: Änderung des Arbeitspunktes mit der Energie

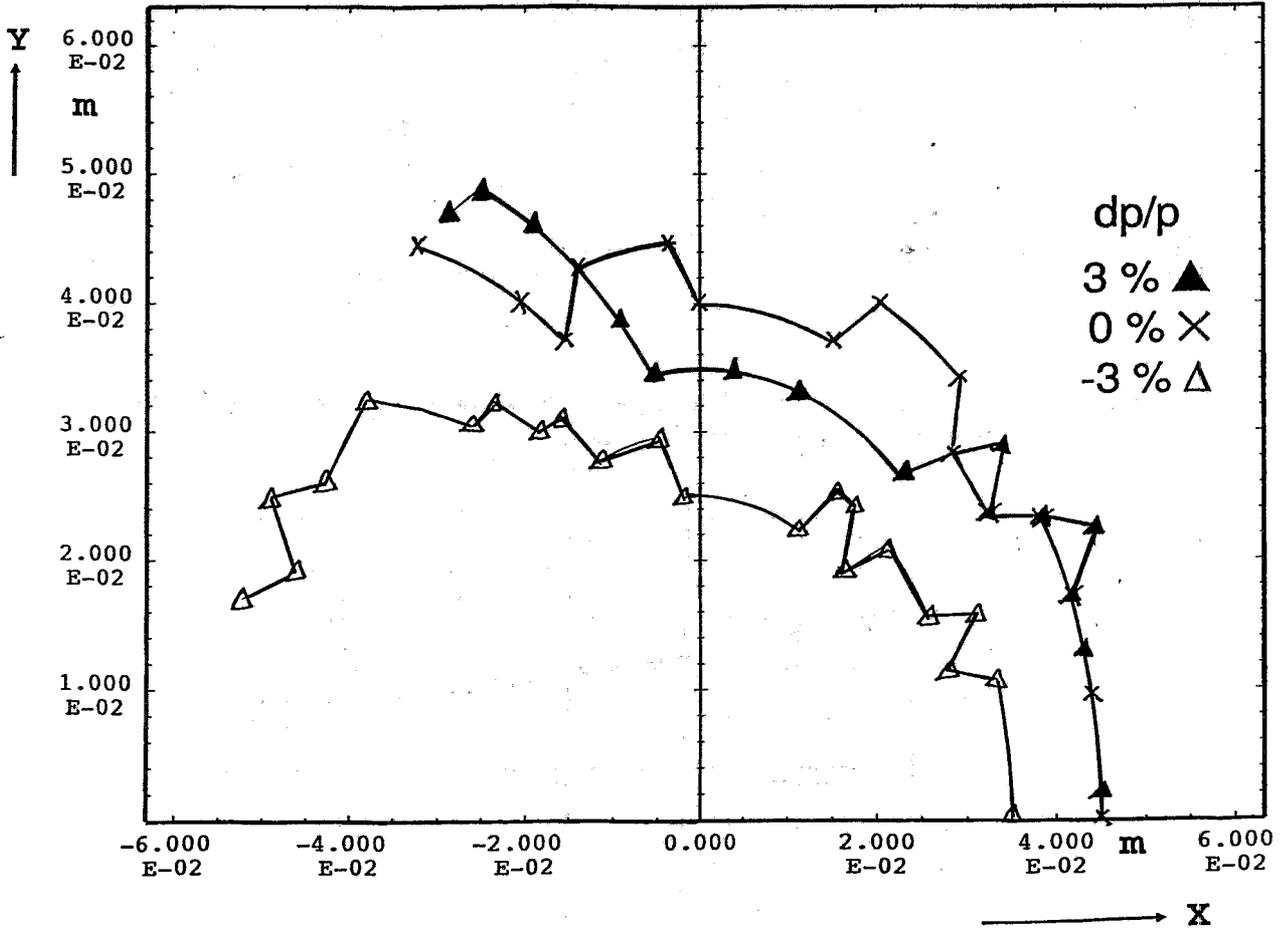


Abb. 17: Die dynamische Apertur des Speicherringes ROSY I bei nomineller Energie und Energieabweichungen von $\pm 3\%$

4. SPEICHERRINGKOMPONENTEN

Beim Bau und Entwurf der Speicherringkomponenten, wie Ablenkmagnete, Quadrupole, Sextupole, HF-Cavitiy und Vakuumsystem liegen mit den Maschinen der 3. Generation [13], [14], [15], [16], [17] zahlreiche Erfahrungen vor. Obwohl sich die Komponenten von ROSY I in einigen Punkten vom herkömmlichen Design unterscheiden, muß eine völlige Neukonzeption nicht durchgeführt werden.

4.1 Ablenkmagnete

Ablenkmagnete mit einem Gradienten wurden für die Synchrotronstrahlungsquelle ALS [13] und ELETTRA [14] entworfen, hergestellt und magnetisch vermessen. Bei ALS hat dieser einen Gradienten von 6.34 T/m und bei ELETTRA von 2.68 T/m. Für ROSY I wird ein Ablenkmagnet mit einem Gradienten $g = 2.3016$ gefordert; dieser ist in etwa um 20 % kleiner als der des ELETTRA-Ablenkmagneten [14]. Somit wird als Grundlage für den ROSY I Ablenkmagneten der von ELETTRA vorgeschlagen (siehe Abb.18) Es ändern sich aufgrund der unterschiedlichen Längen die Abmaße der Leitungsquerschnitte. Die Parameter des Ablenkmagneten sind in Tabelle 2 zusammengestellt und der Querschnitt ist in Abb. 20 wiedergegeben.

Das Polprofil muß entsprechend dem geforderten Gradienten neu berechnet werden. Dieses kann näherungsweise mit den Beziehungen von Quadrupolen geschehen. Der Gradient eines Quadrupoles ist gegeben durch die Beziehungen:

$$g = \frac{dB_y}{dx} = \frac{dB_x}{dy} \quad (14)$$

Das Polprofil eines Quadrupoles ist hyperbelförmig, wobei die Gleichung der Hyperbel durch die Apertur $2 \cdot R_0$ des Quadrupols gegeben ist:

$$Y = \frac{1}{2} R_0^2 \cdot \frac{1}{x} \quad (15)$$

Mit den Bedingungen des Ablenkmagneten, daß am Sollorbit eine magnetische Flußdichte B_0 , ein Gradient g_0 bei einer Gaphöhe $2 h_0$ vorhanden sein soll (siehe Abb. 19), ergibt sich der hypothetische Radius R_0 des Quadrupoles, der den Ablenkmagneten beschreiben soll, zu:

$$R_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot B_0 \cdot h_0}{g_0}} \quad (16)$$

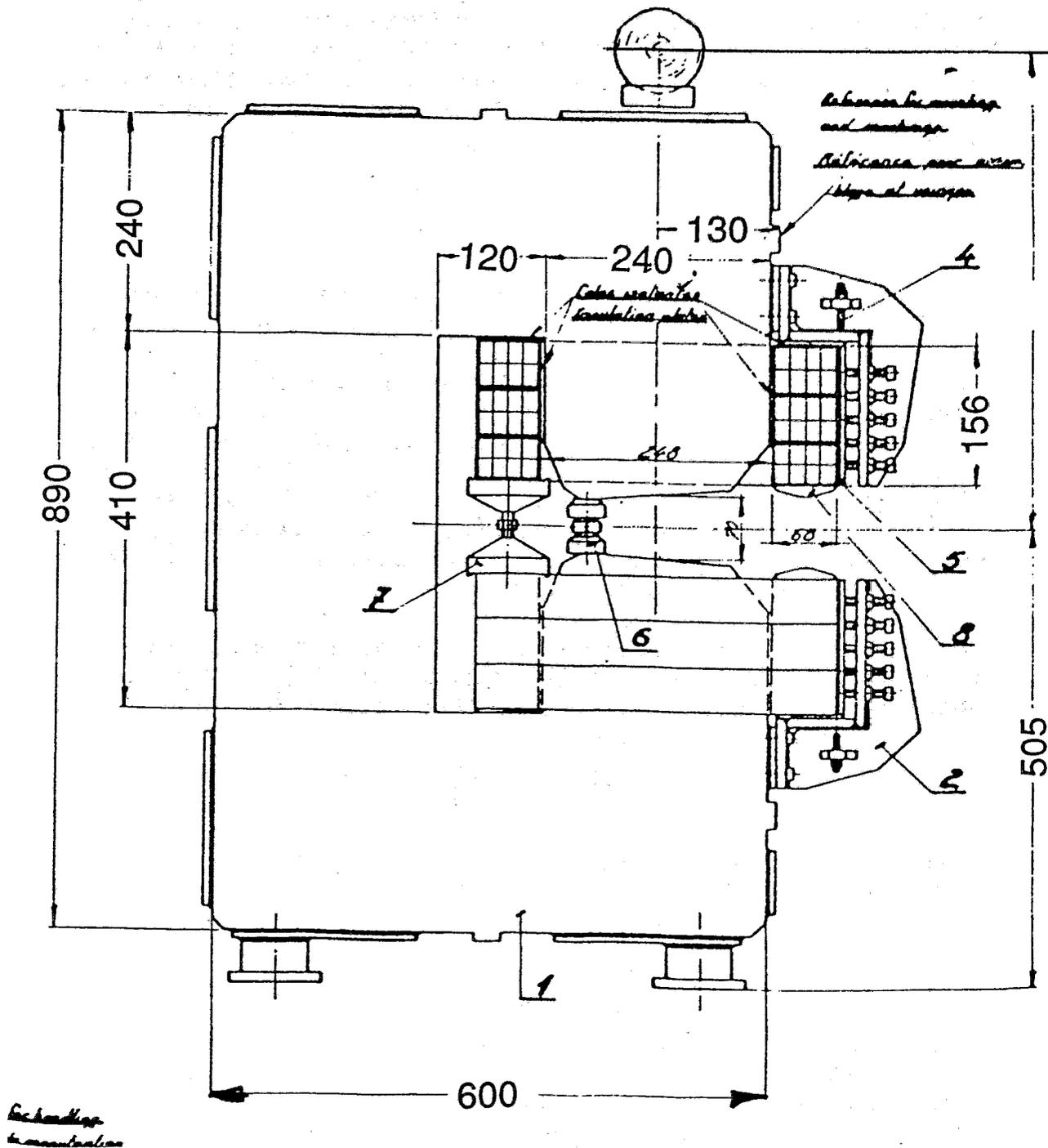


Abb. 18: Ablenkmagnet des Speicherringes ELETTRA, der auch als Ablenkmagnet für ROSY I vorgeschlagen wird.

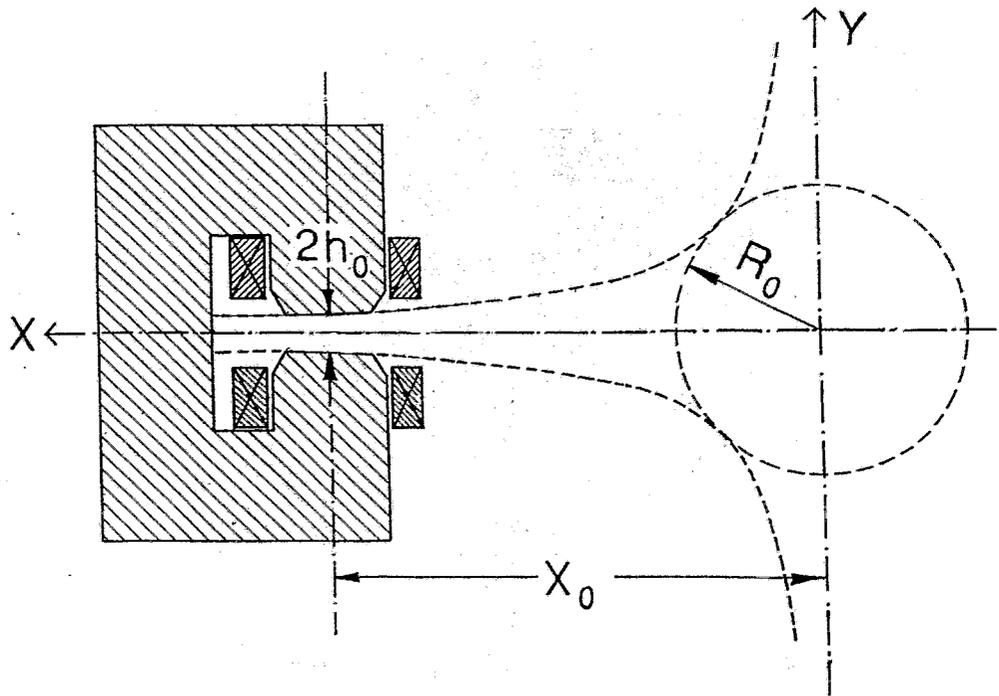


Abb. 19: Beschreibung des Polprofils eines Ablenkmagneten mit Gradienten durch die Größen eines Quadrupoles.

Der Abstand x_0 des Sollorbits vom Mittelpunkt des Quadrupoles, der den Ablenkmagneten beschreibt, berechnet sich zu:

$$x_0 = \frac{1}{2} R_0^2 \cdot \frac{1}{h_0} \quad (17)$$

Das Polprofil $h = f(x)$ schließlich ist bestimmt durch:

$$h = \frac{1}{2} \frac{R_0^2}{(x_0 \pm s)} \quad (18)$$

Entsprechend dem ELETTRA-Ablenkmagneten ergibt sich ein Querschnitt des ROSY I-Magneten, wie er in Abb. 20 dargestellt ist.

Ausgehend von dem sich aus Gleichung (18) ergebenden Polprofil wurden erste Rechnungen für den Magneten von ROSY I mit dem Programmpaket Poisson [30] durchgeführt. Hierbei wurde von einer Gaphöhe von $h = 60$ mm und $h = 70$ mm ausgegangen. Der Verlauf des Polschuhprofils ist für beide Fälle der Abb. 21 zu entnehmen.

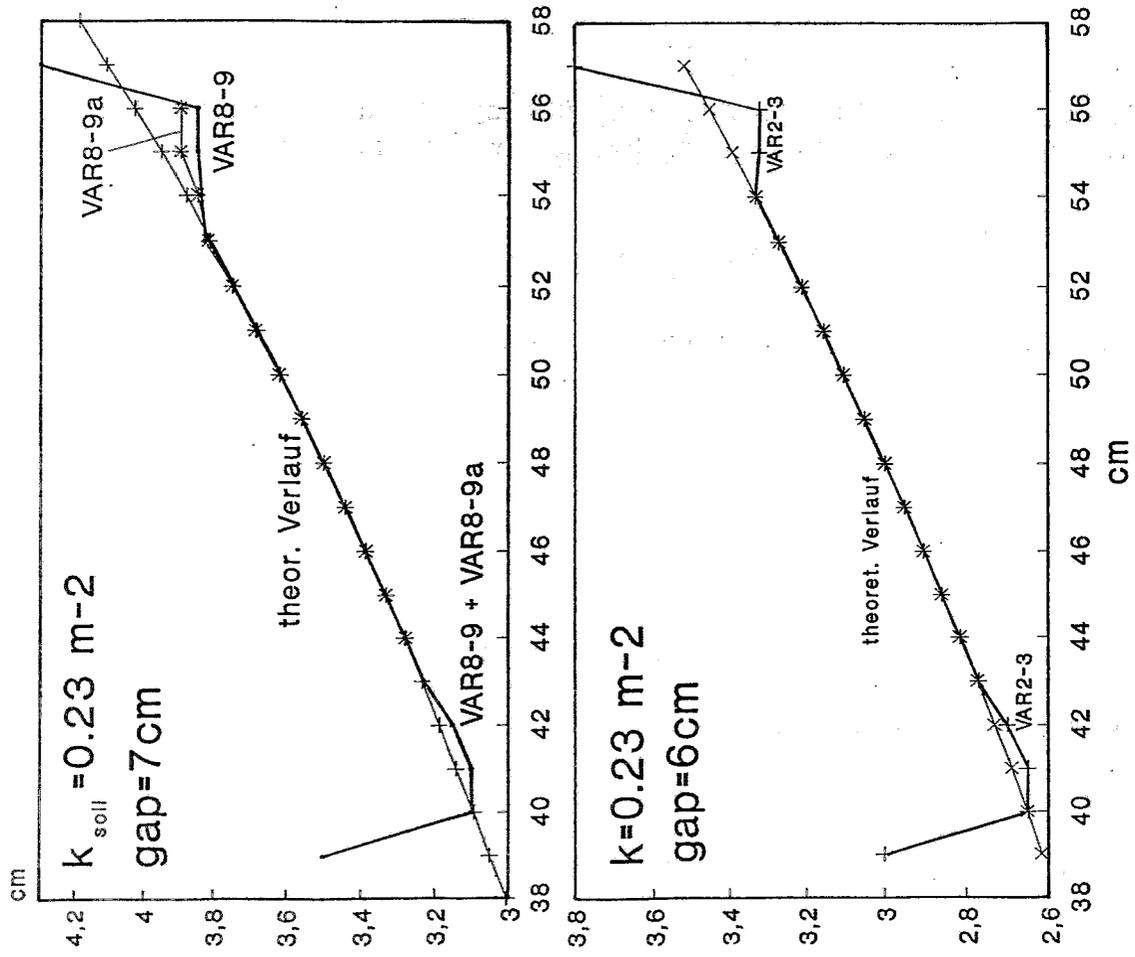


Abb. 21: Polprofil des Ablenkmagneten für ROSY I mit Gaphöhen von 60 mm und 70 mm

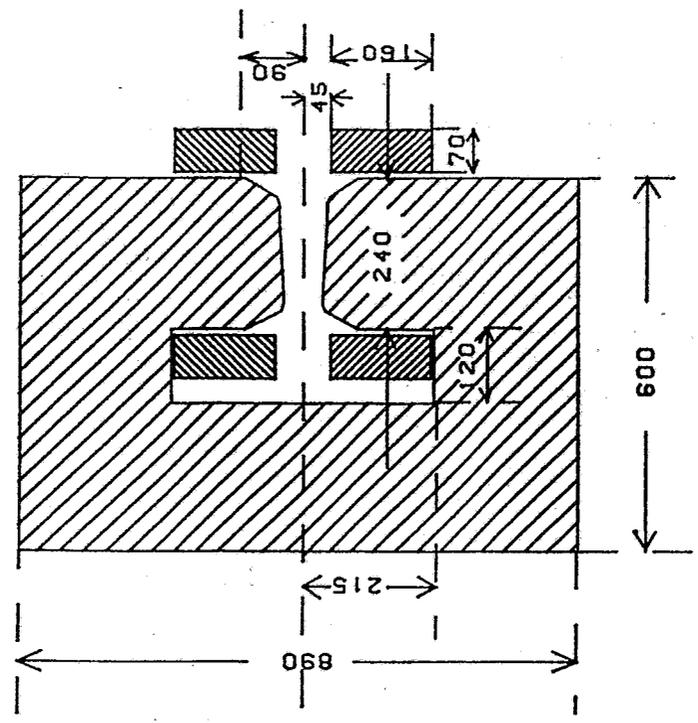


Abb. 20: Querschnitt des Ablenkmagneten vom Boosterspeicherring ROSY I

Zur Erreichung eines möglichst großen Homogenitätsbereiches des Gradienten wurden verschiedene Verläufe an den Enden des Polprofiles untersucht. Bei beiden Gaphöhen wurden insgesamt 6 Variationen an der Innenseite und der Außenseite des Polprofiles durchgeführt (siehe Abb. 22). Die besten Ergebnisse ergeben die Varianten VAR 2-3 für die Gaphöhe 60 mm und VAR 8-9 für $h = 70$ mm. Diese beiden Fälle sind in der Abb. 22 fett eingezeichnet.

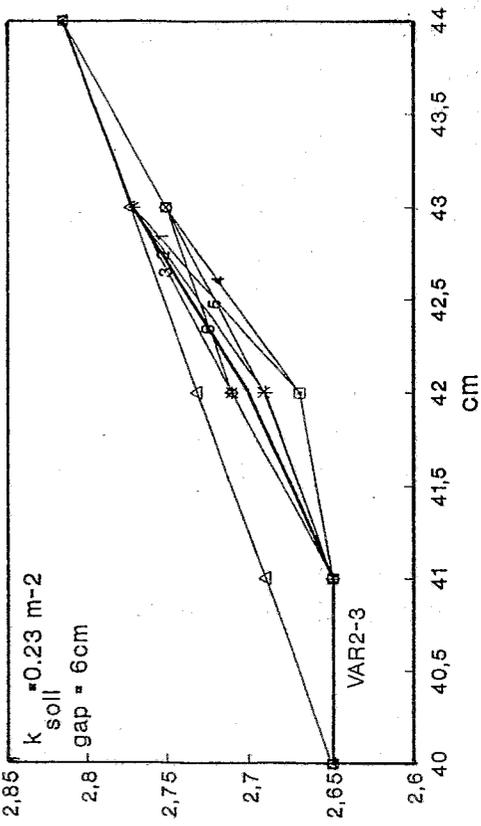
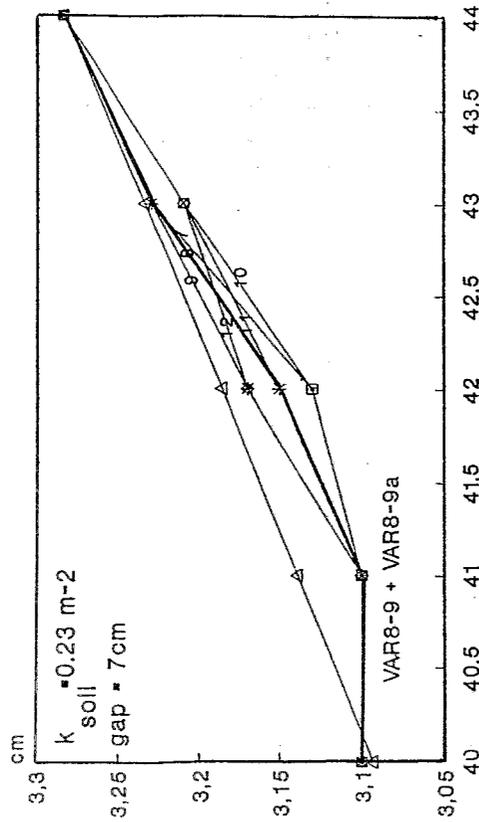
Die radiale Abhängigkeit der magnetischen Flußdichte und des Gradienten innerhalb des Polschuhes ist in der Abb. 23 wiedergegeben. Mit einem "good-field"-Bereich von $\Delta_x = \pm 20$ mm ergeben sich bei der magnetischen Flußdichte relative Abweichungen von $< 1 \times 10^{-3}$ und bei dem Gradienten von $< 4 \times 10^{-2}$. Insgesamt zeigt sich, daß ein Ablenkmagnet mit einer Gaphöhe von 60 mm Vorteile hat: 1. die Erregung ist um 17 % geringer und 2. die relative Änderung des Gradienten ist für $\Delta_x = \pm 20$ mm um den Faktor 2 besser. Weitere Rechnungen müssen zeigen in wie weit Verbesserungen möglich sind.

Nominelle Energie (GeV)	3.0
Anzahl der Ablenkmagnete ($11.25^\circ/22.5^\circ$)	8 / 12
Ablenkradius (m)	7.1477
B_{nom} auf Orbit (T)	1.40
Quadrupolstärke (m^{-2})	0.23
Gradient g (T/m)	2.3016
Feldindex	11.75
Ablenkwinkel ($^\circ$)	11.25 / 22.50
Länge der Dipole (m)	1,371 / 2,765
Polschuhabstand am Orbit (mm)	60
genutzter Feldbereich x/z (mm)	± 20 / $\pm 12,5$
Anzahl der Windungen	48
Anzahl der Spulen	6
Stromstärke (A)	1262.5
Amperewindungen	60600
Leiterquerschnitt (mm^2)	16 x 17
Kühlbohrungsdurchmesser (mm^2)	9
Leistung (kW)	18 / 9
Gewicht (t)	5.1 / 10.2
Druckverlust (bar)	14 / 7
Anzahl der Kühlkreisläufe	6

Tab. 2: Zusammenstellung der Parameter des Ablenkmagneten des Speicherringes ROSY I

ROSY I

Polschuhprofile innen



ROSY I

Polschuhprofile aussen

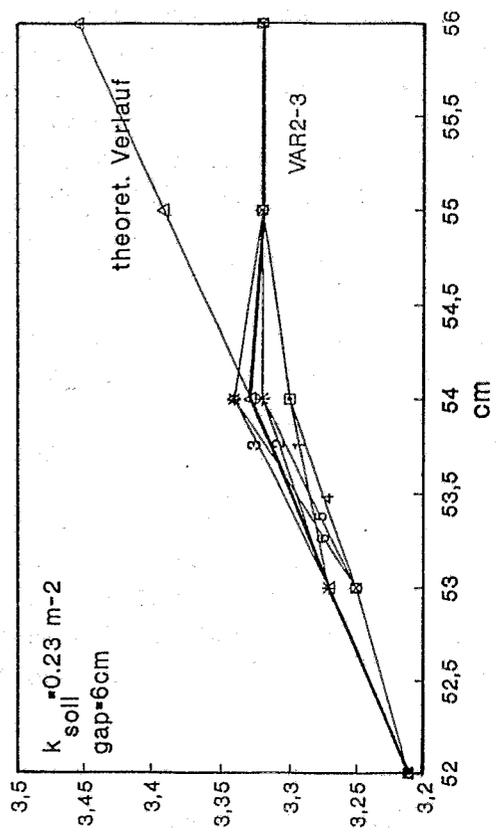
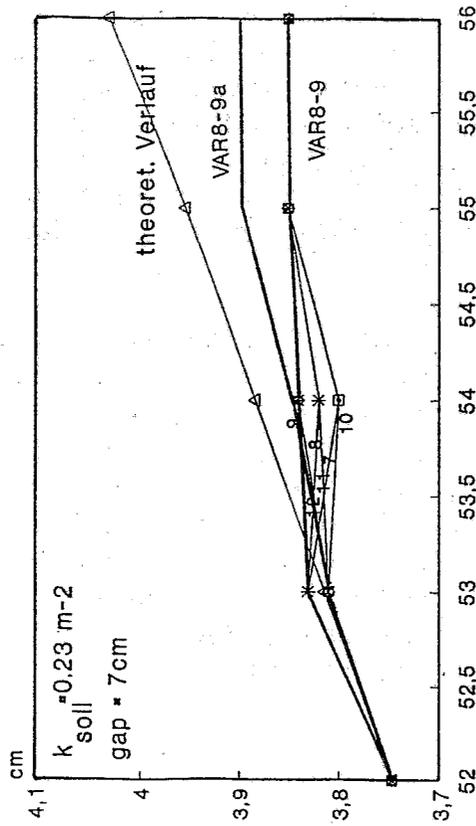
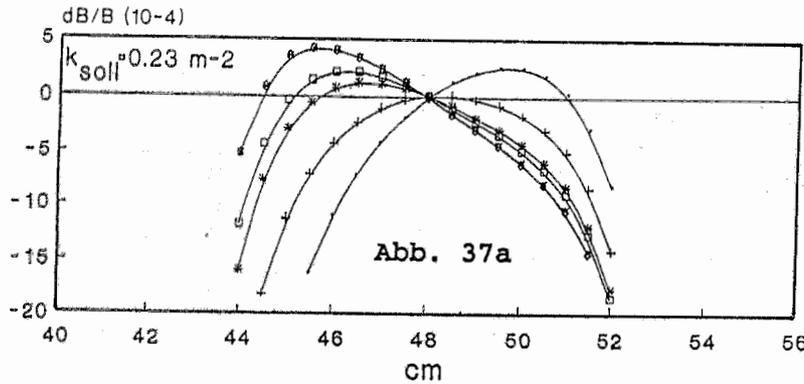
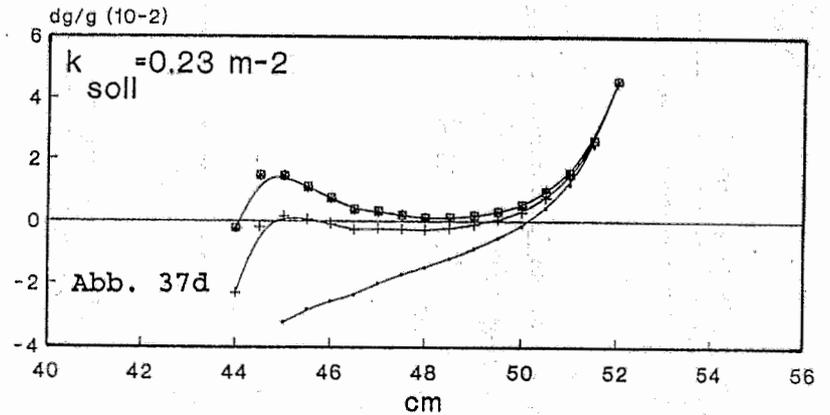
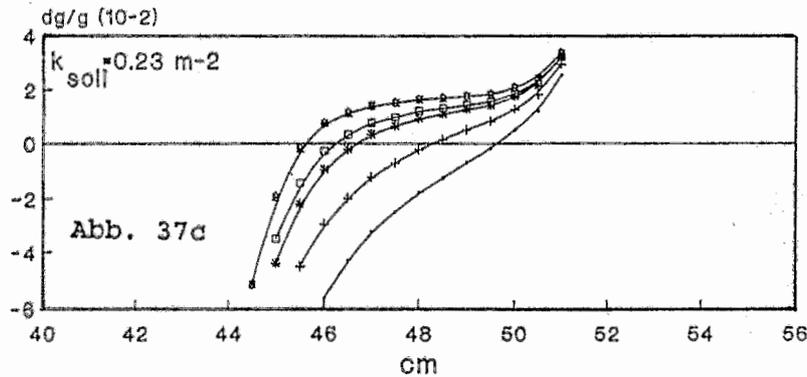
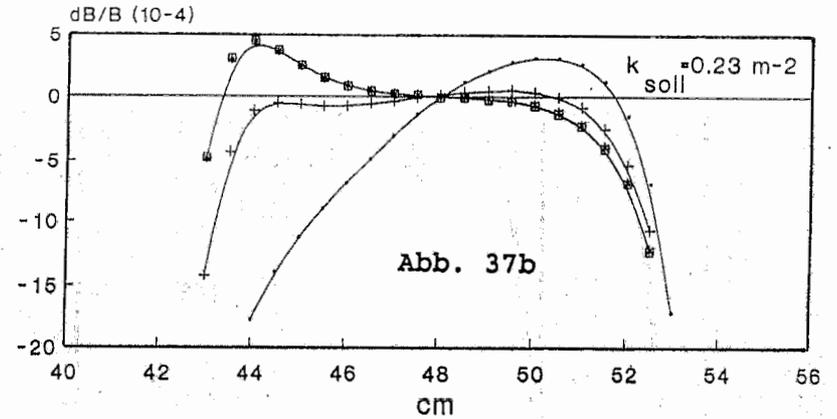


Abb. 22: Variationen des inneren und äußeren Polprofiles zur Erreichung eines großen "good-field"-Bereiches

ROSY I
VAR8-9a : gap=7cm



ROSY I
VAR2-3 : gap=6cm



— 48257 A + 42356 A * 37622 A
 -o- 36708 A * 18235 A -o- 3925.9 A

— 36061 A + 30569 A * 15646 A -o- 3368.6 A

Abb. 23: Radiale Abhängigkeit der Abweichung der magnetischen Flußdichte vom idealen Verlauf für die Gaphöhen 7 cm (37a) und 6 cm (37 b) sowie die radiale Abhängigkeit des Gradienten für die Gaphöhen 7 cm (37 c) und 6 cm (37 d) um den Sollorbit ($x = 48 \text{ cm}$) des ROSY I Ablenkmagneten.

ROSY I

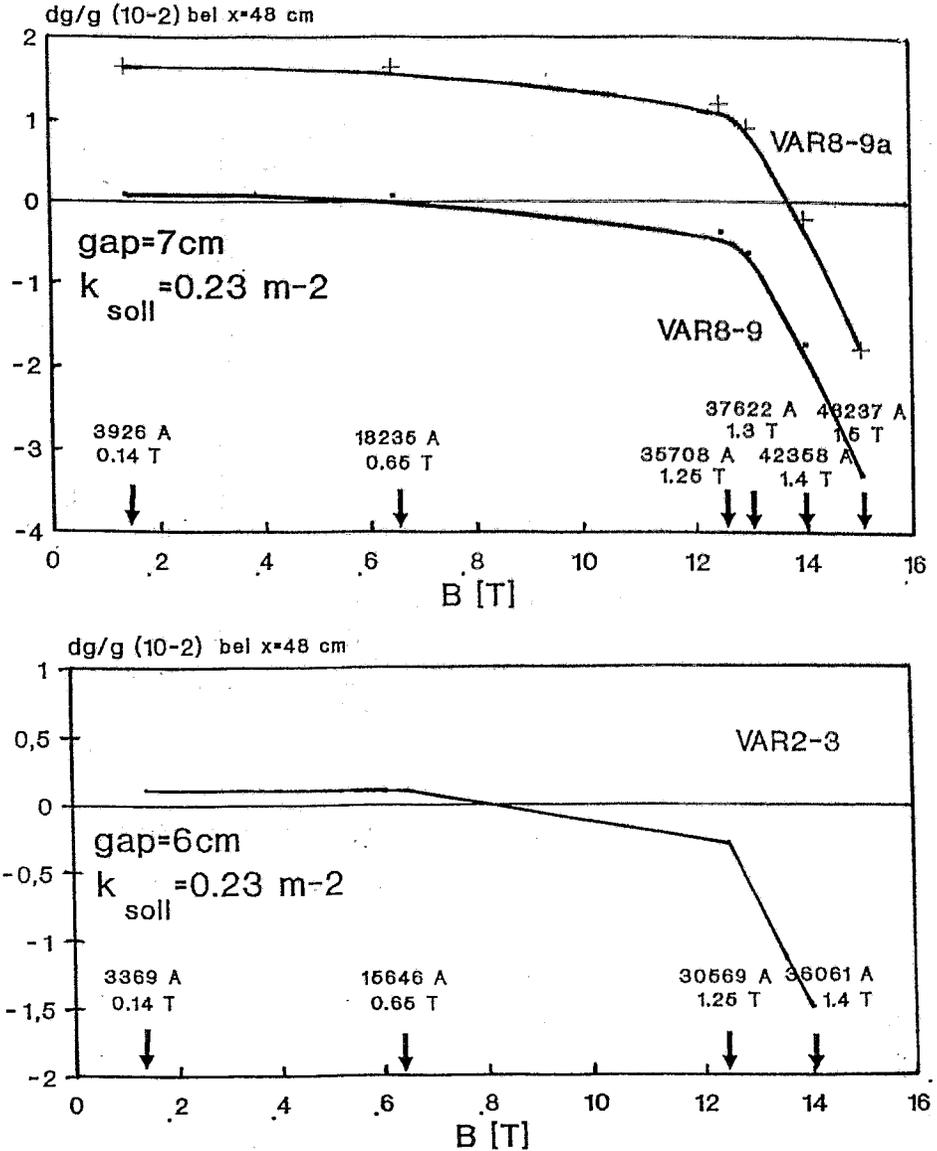


Abb. 24: Abhängigkeit des Gradienten im Ablenkmagneten von ROSY I von der Erregung.

Die Abhängigkeit des Gradienten von der magnetischen Flußdichte, bzw. der Erregung für den Sollorbit ist in Abb. 24 dargestellt. Bis zu einem Feld von 1,2 T ist die Linearität zwischen Gradient und Flußdichte besser als 10^{-3} . Oberhalb von 1,2 Tesla treten Sättigungseffekte auf, die dazu führen, daß bei T = 1,4 Tesla relative Abweichungen um 1,5 % möglich sind.

4.2 Quadrupole

Für den Speicherring ROSY I werden 3 Typen von Quadrupolen benötigt:

Q	Länge	Gradient	Erregung	Anzahl
Q1	0,25m	10 T/m	7520 A Wdg	8
Q2	0,30m	18 T/m	11270 A Wdg	40
Q3	0,40m	18 T/m	11270 A Wdg	8

Max. Energie (GeV)	3.0
Anzahl Quadrupolfamilien	5
Anzahl der Quadrupole	40
Magnetenlänge (m)	0.30
Eisenlänge (m)	0.27
Max. Gradient (T/m)	18
Aperturdurchmesser (mm)	70
Windungszahl per Pol	39
Stromstärke (A)	327
Amperewindungszahl (AWdg)	12753
Leitungsquerschnitt (mm ²)	9 x 6.8
Kühlbohrungsdurchmesser (mm)	4.6
Kühlkreisläufe	4
Leistung (kW)	6.2
Druckverlust (bar)	10
Temperaturerhöhung (°C)	10

Tab. 3: Zusammenstellung der Parameter für den Quadrupol Q2 des Speicherringes ROSY I

Die Quadrupole des Speicherringes ELETTRA [14] erreichen Gradienten von 19.2 T/m bei einer Apertur von 75 mm. Dies sind Werte, die mit denen des ROSY I-Quadrupoles relativ gut übereinstimmen und somit wird der ELETTRA Quadrupol für den Speicherring ROSY I vorgeschlagen. Die wichtigsten Parameter des Quadrupoles vom Typ Q2 sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. Eine Querschnittszeichnung des Quadrupoles Q2 ist in Abb. 25 wiedergegeben.

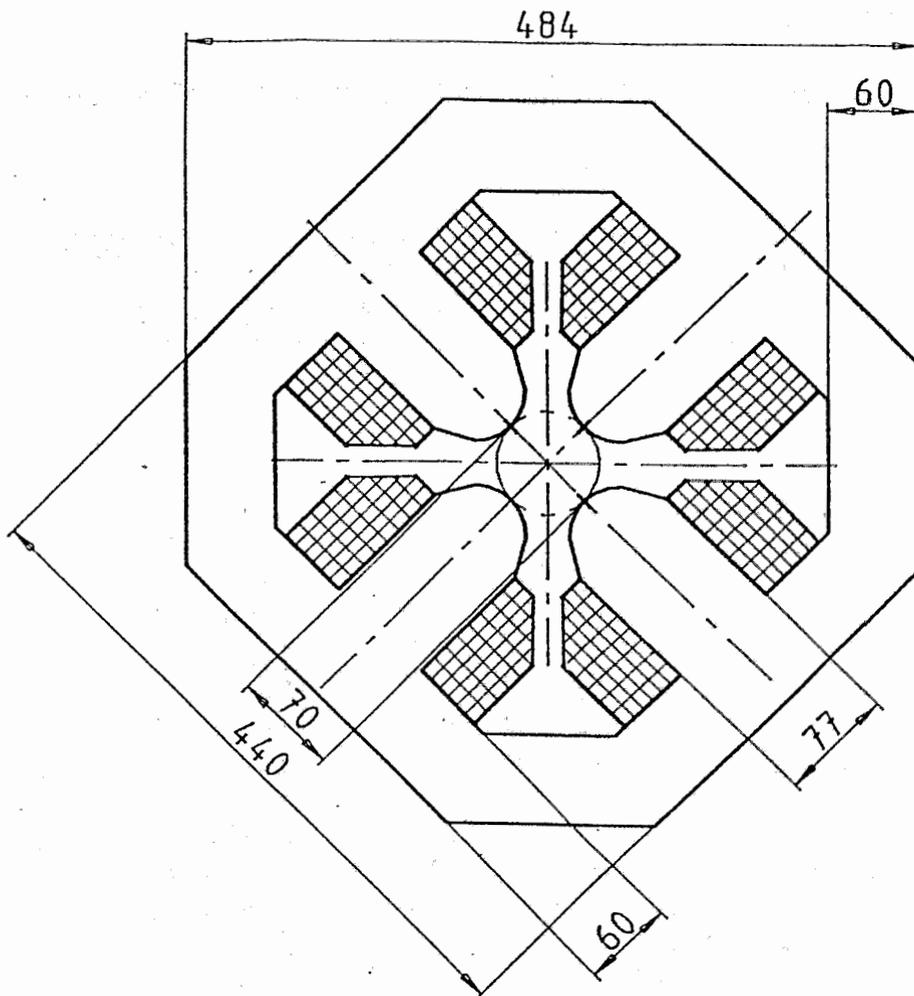


Abb. 25: Querschnitt des Quadrupoles Q_2 für den Speicherring ROSY I

4.3 Sextupole

Für die Sextupole wird eine integrierte Sextupolstärke von

$$\int K \cdot dl = \int \frac{1}{2} \frac{1}{B \cdot \rho} \cdot B_x'' \cdot dl = 1,5 \text{ m}^{-2}$$

gefordert. Bei einer Länge des Sextupoles von 0,075 m folgt hieraus ein differentieller Gradient von $B_x'' = g' = 400 \text{ T/m}^2$. Bei einer Apertur von 70 mm folgt hieraus eine magnetische Flußdichte am Pol von $B_{\text{pol}} = 0,24 \text{ T}$; dies ist ein relativ kleiner Wert. Diese Werte entsprechen denen des Sextupoles des Speicherringes DELTA und somit wird als Sextupol für ROSY I der DELTA-Sextupol vorgeschlagen.

Maximalenergie (GeV)	3.2
Anzahl Sextupolfamilien	2
Anzahl der Sextupole	48
Magnetlänge	0.1
Differentieller Gradient (T/m ²)	350
Amperewindungszahl	2000
Windungszahl je Pol	1820
Stromstärke (A)	1.1
Leitungsquerschnitt (mm ²)	1 * 1
Leistung (W)	72

Tab. 4: Zusammenstellung der Parameter für den ROSY I-Sextupol

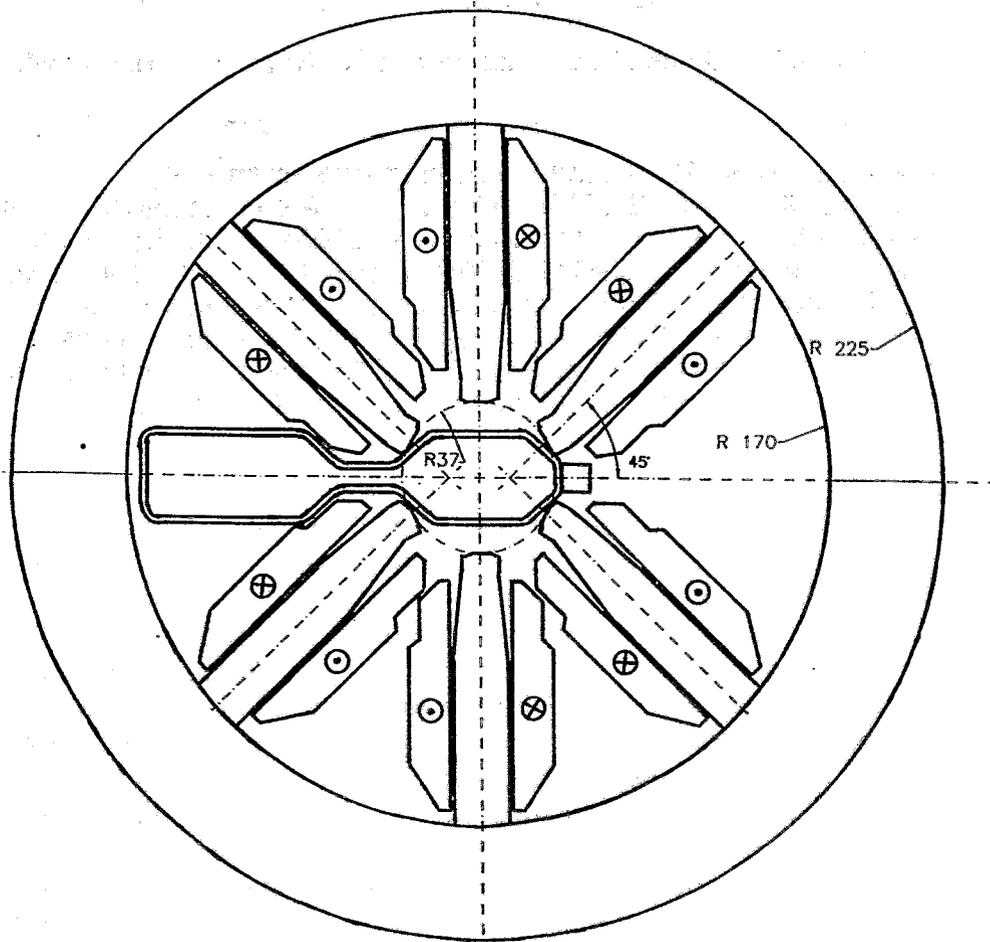


Abb. 26: Querschnitt des ROSY I-Sextupoles

4.4 Netzgeräte für ROSY I

Die Magnetstromversorgungen von ROSY I müssen aufgrund des Synchrotron- und des Speicherringbetriebes sowohl dynamische als auch statische Betriebsbedingungen erfüllen. Die geforderte Stromfunktion ist in folgender Abb. 27 wiedergegeben:

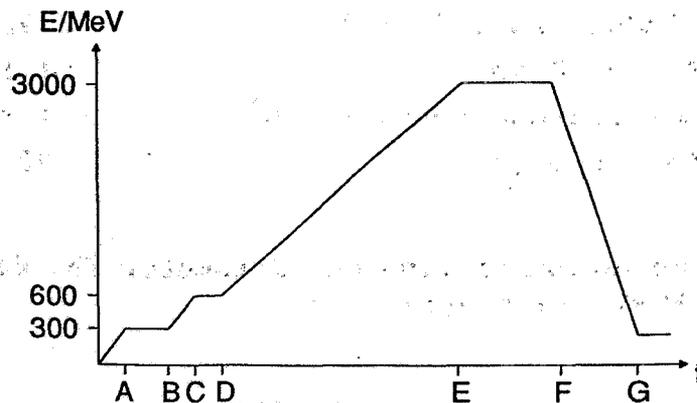


Abb. 27: Stromfunktion für die Magnete bei ROSY I

Für das Zeitintervall 0 - A besteht keine besondere Anforderung.
Für das Zeitintervall A - B, 300 MeV Niveau, ist die Accumulationsdauer bestimmend.
Das Zeitintervall B - C, Rampe von 300 MeV auf 600 MeV beträgt 0,5 sec.
Für das Zeitintervall C - D, 600 MeV Niveau, ist die Optimierungsdauer bestimmend.
Das Zeitintervall D - E, Rampe von 600 MeV auf 3 GeV beträgt 4,5 sec.
Das Zeitintervall E - F, wird durch die Speicherzeit des Strahles bestimmt.
Das Zeitintervall F - G, Rampe von 3 GeV auf 300 MeV bestehen keine Anforderungen, die Zeit wird durch die Zeitkonstante der Magnete bestimmt.

Die geforderte Stromstabilität für Dipol- und Quadrupolgeräte beträgt $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ bezogen auf den Nennstrom für 24 h. Die Restwelligkeit des Stromes ist $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ bezogen auf den Nennstrom. Für die Sextupole und die Korrekturlemente betragen die entsprechenden Werte $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ bzw. $\pm 5 \cdot 10^{-5}$. Die Anforderung für die Trackinggenauigkeit beträgt $\pm 5 \cdot 10^{-3}$. Diese Größe wird sowohl von der Schnelligkeit des Kontrollrechners, sowie der Rippelunterdrückung während der Rampe bestimmt. Bei klassischen Stromrichtern bedarf es daher entsprechend ausgelegter aktiver Filter. Eine andere Möglichkeit sind pulsbreitengesteuerte (getaktete) Netzgeräte. Hierbei kann die Taktfrequenz bis zu 20 kHz betragen. Hierzu sind aber eingehende Studien notwendig, um den Nachweis der Möglichkeit dieser Techniken bei den hohen Leistungen zu erbringen.

Aufgrund der Anforderungen ergeben sich die in Tabelle 5 aufgeführten Magnetfamilien mit den zugehörigen Netzgeräten. Insgesamt wird für die Versorgung der Magnete eine Leistung von 2 MW benötigt:

Magnet	Anzahl der Magnete pro	Anzahl der Familien	\hat{U} [V]	I_{nom} [A]	P [kW]
Dipol 1	8	1	190	1800	342
Dipol 2	12	1	530	1800	954
Q 1	8	1	230	290	66.7
Q 2	8	1	154	290	44.7
Q 3	8	1	167	290	48.4
QF A	8	1	167	290	48.4
QF E	24	1	485	290	141
SV	24	1	337	290	97.7
SH	24	50	337	290	97.7
Steerer			60	15	0.9

$$\underline{\underline{\Sigma = 1841.5 \text{ kW}}}$$

Tab. 5: Netzgeräte für den Booster-Speicherring ROSY I

4.5 Hochfrequenzsystem

Das HF-Beschleunigungssystem hat die Aufgabe, den Energieverlust auszugleichen, den die im Speicherring umlaufenden Elektronen durch die Abstrahlung von Synchrotronlicht in den Ablenkmagneten und den "Insertion Devices" erfahren. Weiterhin müssen vom HF-System die Verluste der Zuleitungen und der Anregung höherer Modi gedeckt werden. Insgesamt gilt folgende Leistungsbilanz:

$$P_{HF} = P_B + P_{CAV} + P_L + P_{HOM} \quad (19)$$

näherungsweise:

$$P_{HF} = 1.2 (P_B + P_{CAV}) \quad (20)$$

mit:

$$P_{CAV} = U_{CAV}^2 / 2 R_S = q^2 U_0^2 / 2 e^2 R_S \quad (21)$$

$$P_L \approx 0.1 P_{HF} \quad (22)$$

$$P_{HOM} \approx 0.1 P_{HF} \quad (23)$$

Hierbei bedeuten:

R_S:	Shunt-Impedanz des Cavitysystems
P_{HF}:	vom HF-System aufzubringende Hochfrequenzleistung
P_B:	"beam power", auf den Elektronenstrahl zu übertragende HF-Leistung
P_{CAV}:	Verlustleistung des Cavitysystems, die zum Aufbau des elektrischen Feldes erforderlich ist
P_L:	HF-Leitungsverluste (ca. 0,1 P)
P_{HOM}:	HF-Verluste durch Anregung nicht erwünschter Modi
U_{CAV}:	Umlaufspannung

Die in einer Cavity auf den Elektronenstrahl beschleunigend wirkende Spannung

$$U_{CAV} = \int_0^l E_z(z,0) dz \quad (24)$$

ist um den Überspannungsfaktor q größer, als die dem Energieverlust U_0 der Elektronen pro Umlauf entsprechende Spannung. Der Überspannungsfaktor q bzw. der Phasenwinkel θ ($\sin \theta = 1/q$) ist notwendig, um eine genügende Energieakzeptanz ΔE und eine entsprechende Lebensdauer τ zu erreichen. Die Lebensdauer des im Ring umlaufenden Elektronenstrahles ist korreliert mit der

longitudinalen Energieakzeptanz und abhängig von Quantenfluktuationen, Tauschektreuung und inelastischer Streuung der Elektronen an Restgasatomen.

Die Wahl der Beschleunigungsfrequenz ist abhängig von der gewünschten Bunschlänge ($l_t \approx 1/\sqrt{f}$), vom zur Verfügung stehenden Platz für Cavities und ganz wesentlich von der Verfügbarkeit und dem Preis erprobter Komponenten für das Beschleunigungssystem. Aus diesem Grund wird für ROSY I eine Frequenz von 500 MHz vorgeschlagen, da in den Projekten SRS, DESY, BESSY, KEK, ELETTRA und ALS umfangreiche Erfahrungen mit diesem System vorliegen. Die Parameter des HF-Systems sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Bezüglich des Dynamikumfanges der HF-Leistungsregelung sowie des Regelbereiches der Phasenregelung muß das HF-System von ROSY I flexibel dimensioniert werden, da die Elektronen von der Injektionsenergie $E_{inj} = 0.3$ GeV bis zur Endenergie $E_0 = 3$ GeV beschleunigt werden.

Die Umlaufspannung U_0 , der Overvoltage Faktor q und die in den Magneten abgestrahlte Leistung bei $I = 0.1$ A und $I = 0.25$ A sind in der folgenden Tabelle 6 wiedergegeben. Die Parameter des HF-Systems sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

E(GeV)	B(T)	U_0 (kV)	q	U_c (kV)	P_b (kW)	
					0.1 A	0.25 A
0.3	0.140	0.10	30.0	3.00	0.01	0.025
0.5	0.233	0.773	20.0	15.46	0.193	0.193
1.0	0.467	12.38	7.50	92.85	1.238	3.095
1.5	0.700	63.11	6.00	378.66	6.268	15.70
2.0	0.933	198.1	5.00	990.50	19.81	49.50
2.5	1.167	483.7	4.50	2176.5	48.37	120.90
3.0	1.400	1003.0	4.00	4011.6	100.3	250.70

Tab. 6: Zusammenstellung der Umlaufspannung U_0 , des Überspannungsfaktors q und der gesamten Cavityspannung U_c sowie der in den Magneten abgestrahlte Leistung für $I = 0.1$ A und $I = 0.25$ A, während eines Beschleunigungszyklusses von $E_{inj} = 0.3$ GeV bis $E_0 = 3.0$ GeV.

Nominelle Energie	E_{\max}	(GeV)	3.0
Speicherringumfang		(m)	120.0
Max. Elektronenstrom	I_{\max}	(A)	0.1 (0.25)*
Frequenz	f	(MHz)	500
Anzahl der Bunches			200
Momentum Compaction Factor			0.01
Dämpfungszahl	D		-0.634
Dämpfungsfunktionen			
horizontal	(Jx)		1.634
vertikal	(Jy)		1
longitudional	(Js)		1.366
Energie pro Umlauf	U_0	(keV)	1033
Ablenkmagnete			1003
Insertion Devices			30
Abgestrahlte Leistung	P_B	(kW)	103 (258)*
Ablenkmagnete			100 (250)*
Insertion Devices			3 (7.5)*
Synchrone Phase	θ	(deg)	14.5
Überspannungsfaktor	q		4
Umlaufspannung	U_{CAV}	(MV)	4.13
Energieakzeptanz	$\Delta E/E_0$	(%)	1.67
Natürliche Energiebreite			1.16×10^{-3}
Bunchlänge	l_b	(mm)	18.54
Anzahl der Cavities			4
Spannung pro Cavity	U_{CAV1}	(MV)	1.033
Verlustleistung Cavities	P_{CAV}	(kW)	280
Gesamte HF-Leistung	P_{HF}	(kW)	456, (636)*

Tab. 7: Zusammenstellung der Parameter des HF-Systems bei nomineller Energie $E_0 = 3$ GeV

*: In einer späteren Phase soll das HF-System zur Beschleunigung eines Stromes von 0.25 A aufgerüstet werden.

Im folgenden sollen einige Cavities für die Verwendung bei ROSY diskutiert werden. In der zugehörigen Übersicht sind zunächst die typischen Parameter der Speicherringanlage, danach die des HF-Systems und schließlich die einer einzelnen Cavity aufgeführt:

Parameter	ROSY	ALS	ELETTRA	BESSY II
E_{\max} [GeV]	3.2	2.0	2.0	1.9
I_{\max} [A]	0.3	0.4	0.4	0.1
U_0 [keV]	1378	162.5	320	342
P_b [kW]	413.4	65	128	34.2
q	4.62	9.2	5.7	5.6
θ [deg]	12.5	6.2	10	10.2
U_{CAV} [MV]	6.353	1.5	1.824	1.915
R_s [$M\Omega$]		16	14.4	11.6
P_{CAV} [kW]		140	115.5	161
P_{HF} [kW]		300	243.5	221
EINZELCAVITY				
R_s [$M\Omega$]		8	2.4	2.9
P_{CAV} [kW]		70	16.7	40.3
P_{HF} [kW]		150	40.6	55
U_{CAV} [MV]		0.75	0.3	0.48
P_b [kW]		32.5	21.3	8.5
Anzahl Cav.		2	6	4

Vergleicht man die tabellierten Daten bezüglich der für ROSY benötigten Umfangsspannung $U_{\text{CAV}} = 1.03$ MV je Cavity, so werden für ROSY I mindestens 4 Stück ALS-Cavities bzw. 8 Cavities von ELETTRA bzw. BESSY benötigt. Dabei wurde die vergleichsweise hohe P_b von ROSY noch nicht berücksichtigt.

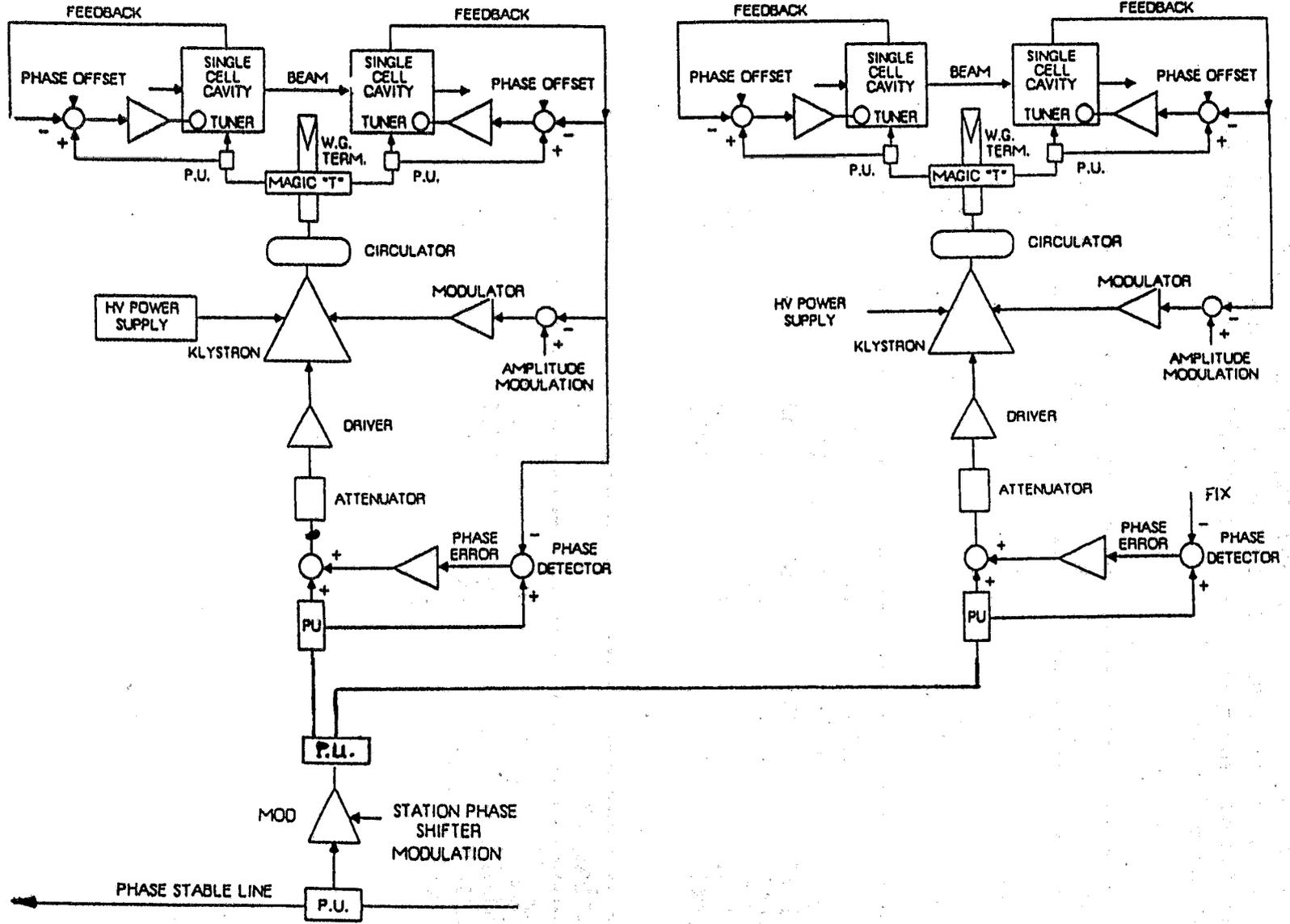


Abb. 28: HF-System für den Speicherring ROSY I

Zusammenstellung der Parameter für ROSY:

• Einzelcavity des ALS-Typs

$P_{CAV} = 70 \text{ kW}$, ($U_{CAV} = 1.06 \text{ MV}$), $P_B[0.1 \text{ A}] = 25 \text{ kW}$

$P_B[0.25 \text{ A}] = 63 \text{ kW}$

$P_{HF}[0.1 \text{ A}] = 114 \text{ kW}$, $P_{HF}[0.25 \text{ A}] = 160 \text{ kW}$ (jeweils 20% Verlust)

• Gesamtsystem mit 4 Cavities

$P_{CAV} = 280 \text{ kW}$, $P_{HF}[0.1 \text{ A}] = 456 \text{ MW}$, $P_{HF}[0.25 \text{ A}] = 636 \text{ MW}$

Für ROSY I werden mit vier Cavities zwei Leistungsklystrons benötigt, die bei einer insgesamt zu installierenden HF-Leistung von 0.64 MW im linearen Bereich ihrer Kennlinie bei etwa 320 kW betrieben werden.

Vorgeschlagen wird ein modularer Aufbau nach Abb. 28. Das System besteht dabei aus zwei Einzelsystemen, die bereits in Berkeley bei der ALS erfolgreich realisiert worden sind. Ein derart redundant aufgebautes System hat den Vorteil, daß bei Wartungsarbeiten oder beim Ausfall eines Teilsystems, ROSY mit geringem Strom weiterbetrieben werden kann. Das ist bei einer derart komplexen Anlage notwendig. Eine Analyse zeigt auch, daß ein modular aufgebautes System vergleichsweise nicht teurer ist, als ein Großklystron, das die gesamte HF-Leistung des Systems bereitstellen kann, aufgebautes System inclusive des HF-Verteilersystems auf der Auskoppel-seite. Bei dem vorgeschlagenen System mit drei HF-Verstärkern, die jeweils zwei Cavities treiben, sind auch die Phasenbeziehungen der HF-Leistung an den einzelnen Cavities besser beherrschbar.

Die vorgeschlagene Lösung ist in Abb. 28 dargestellt. Die zwei Großklystrons YK 1305 (Philips) können maximal 440 kW HF-Leistung abgeben und werden aus einer gemeinsamen Kollektorstromversorgung aber mit jeweils getrennten Hilfsnetzgeräten betrieben.

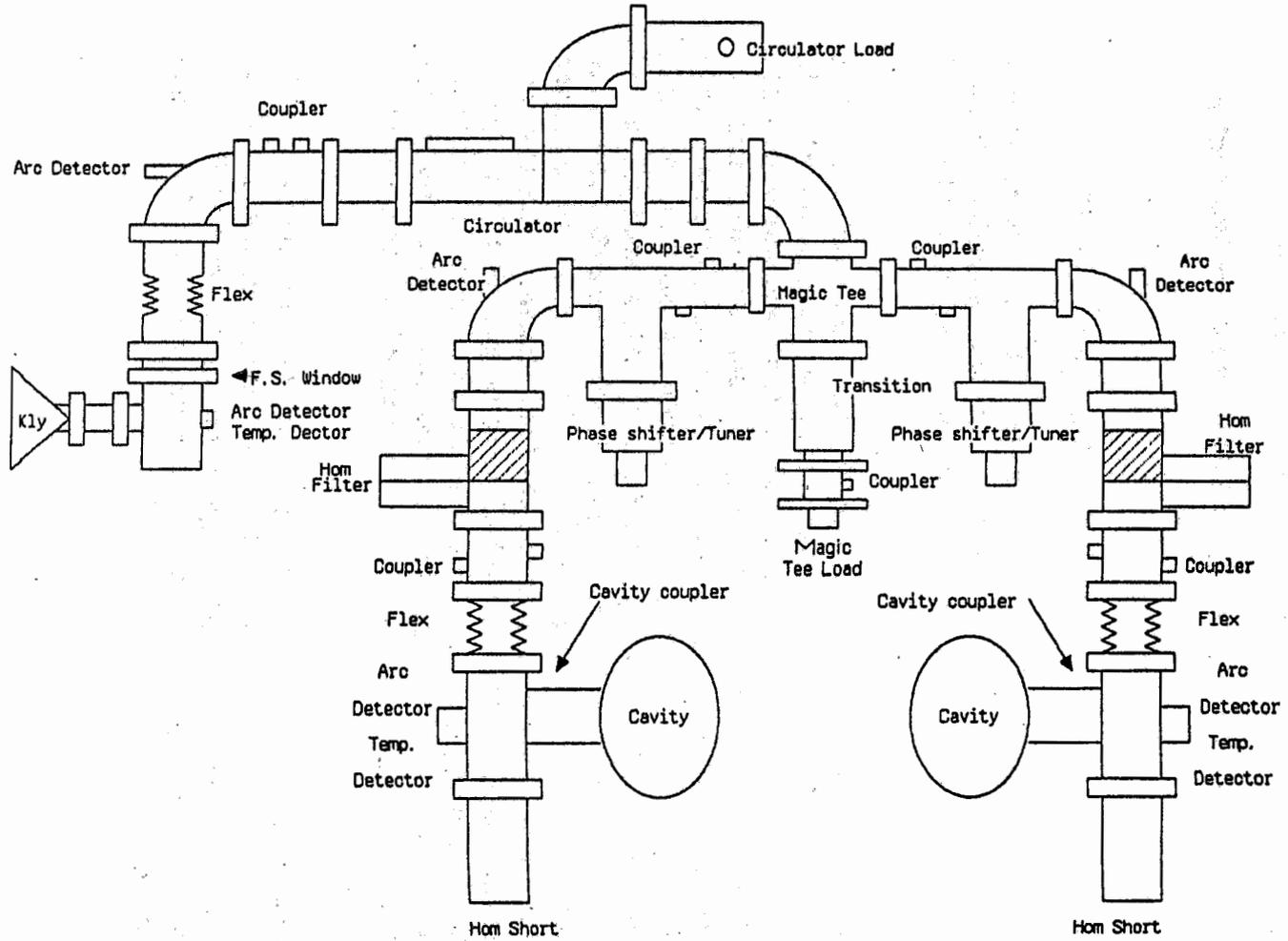


Abb. 29: Wellenleitersystem der HF-Versorgung der Cavities

Ein phasenstabiler Hauptoszillator - als Referenzfrequenz für Speicherring, Booster und Injektor - erzeugt die Arbeitsfrequenz von 500 MHz. Über Leistungsteiler wird dieses Referenzsignal gesplittet. Ein nachfolgender, elektronisch regelbarer Phasenschieber erlaubt die Anpassung der Phase dieses Signals bezüglich der Phase des in den Speicherring injizierten Elektronenstrahles. Nach der erneuten Signalverzweigung erfolgt mittels festen Phasenschiebern die Anpassung der Zweige untereinander. Über PIN-Dioden, Regler und die erforderlichen Treiber (Transistormodule, ca. 50 W HF) werden jeweils ein Großklystron angesteuert. Es verfügt über separate Hilfsnetzgeräte, Crowbar- und Interlocksystem und treibt jeweils zwei Cavities. Der Zirkulator am Ausgang des Klystrons vermeidet eine Überlastung des Klystrons bei Fehlanpassung auf der Cavityseite. Die Leistungsaufteilung auf die zwei Cavities wird durch ein Magisches T (Hohlleiterausführung eines Wilkinson Leistungsteilers) realisiert [13]. (siehe Abb. 29)

Die bei Fehlanpassung einer Cavity bzw. bei unsymmetrischer Leistungsaufteilung auf einer der beiden Zweige reflektierte Leistung wird im Terminator (wassergekühlter Absorber) aufgenommen. Je Zweig folgen ein Richtkoppler zur Anpassungsmessung und zur Signalerzeugung für die Tunerregelungen. Die Tunerregelung bewirkt, daß die Resonanzfrequenz der Grundmodi jeder Cavity beim Durchgang des Elektronenstrahls durch die Cavity entsprechend der Strahlbelastung so nachgeregelt wird, daß der HF-Generator stets eine reelle Last angeboten bekommt. Die größte auszuregelnde Frequenzabweichung errechnet sich zu:

$$\Delta f/f = R_s I_B \cos \theta / 2 Q U_{CAV} \quad (25)$$

Sie beträgt für die vorgeschlagene Cavity und den ROSY-Strahlparameter 23 kHz.

4.6 Kontroll- und Informationssystem

Die erfahrungsgemäß lange Zeitdauer von der Idee bis zur Realisierung eines Beschleunigers vom Umfang wie ROSY I im Bereich von mehreren Jahren hat zur Folge, daß die im Kontrollsystem eingesetzte Computertechnik einschließlich der Prozeßknoten und Kommunikationstechnik mehreren Generationswechselln unterliegt und deshalb die Innovationsfähigkeit bei der Grundkonzeption des Kontrollsystems von ausschlaggebender Bedeutung ist. So sollen im derzeitigen Projektstadium für das Kontrollsystem vorerst nur Tendenzen moderner und zukunftsorientierter Steuerungsprinzipien unter Einbeziehung der an den vorhandenen Beschleunigern gewonnenen Erfahrungen auf das ROSY-Projekt projiziert werden.

Die Orientierung auf ein geschlossenes, für Industriebelange konzipiertes Steuerungs- und Leitsystem ist wenig sinnvoll, da ein Beschleuniger aus der Sicht der Steuerungstechnik ein Großexperiment mit hohen Anforderungen an Flexibilität des Systems darstellt, wie auch viele der projektierten oder realisierten Kontrollsysteme vergleichbarer Beschleuniger reflektieren. Diese Aussage wird durch die Erfahrung unterstützt, daß häufig Anforderungen der zahlreichen Subsysteme erst in der Konstruktions- oder gar erst in der Realisierungsphase formulierbar sind, da viele Beschleunigerkomponenten aus dem nichtkommerziellen Bereich kommen und Modellcharakter haben.

Das Kontrollsystem läßt eine grobe Unterteilung in

- Leitstand
- Kommunikationssystem und
- Prozeßsteuerung

zu.

Die im Leitstand ankommenden Informationen über Betriebsparameter des Beschleunigers müssen so effektiv wie möglich dem Bedienpersonal zur Verfügung gestellt werden. Eine hohe Aussagekraft der Prozeßdarstellung muß mit einer logistisch durchdachten Bedientechnologie gepaart sein. Als derzeit modernste und zukunfts-trächtige Bedienoberfläche auch für Leitstandstechnologie hat sich die Fenstertechnik (windowing) nach dem X11-Standard mit sogenannten X-Terminals favorisiert. Die menü- und iconorientierte Prozeßbeeinflussung sowie die auf leistungsfähigen Grafikstandards (z. B. GKS, AVS, PHIGS etc.) basierende Prozeßvisualisierung auf den X-Terminals sollte aber dennoch durch "klassische" Eingabemöglichkeiten wie Rollkugel, Drehgeber oder sogar Touchpanels, wie derzeit bei vielen Beschleunigern im Einsatz, ergänzt werden. In welchem Umfang, bedarf noch genauerer Untersuchungen.

Ein leistungsfähiges Kommunikationssystem bildet das Fundament für den sicheren Betrieb des Beschleunigers inclusive aller seiner peripheren Einrichtungen. Kommunikationssysteme für diesen Zweck werden heute fast durchgängig als lokale Netze (Local Area Networks = LAN) aufgebaut. Die exploisionsartige Entwicklung von LAN-Komponenten und Strategien wurden durch Empfehlungen der ISO als sogenannte OSI-Richtlinien (OSI = Open Systems Interconnection) in eine Anzahl von offiziellen Standards bzw. Industriestandards, die als de facto Standards Anwendung finden, einem Ordnungs- und Wertungsprinzip zugeführt. Ohne auf Einzelheiten näher einzugehen, seien die Normen IEEE 802X erwähnt, in denen wesentliche Bestimmungen für die LAN-Gestaltung enthalten sind. Übertragungsgeschwindigkeiten liegen im Bereich von 3 Mbit/s beim sogenannten Tokenverfahren (deterministes Zugriffsverfahren) bis zu 10 Mbit/s beim ETHERNET mit dem CSMA/CD, einem stochastischen Zugriffsverfahren. Diese Bruttoübertragungswerte werden durch Softwareoverhead teilweise erheblich reduziert, reichen aber bei richtiger Dimensionierung unter Normallast in einer Büroumgebung in der Praxis aus.

Für Prozeßsteuerungsaufgaben stehen Forderungen wie höchste Betriebssicherheit, Echtzeitfähigkeit und determinierte Antwortzeiten an. Deshalb wird vorgeschlagen, für ROSY als Basiskommunikationssystem ein sogenanntes FDDI-Backbone in topologischer Anlehnung an die Ringstruktur des Beschleunigers zu installieren. FDDI (Fibre Distributed Data Interface) ist ein Hochgeschwindigkeitsnetz (100 Mbit/s), das durch die optischen Übertragungsstrecken, seine kollisionsfreie Arbeitsweise und verschiedene Mechanismen zur Erhöhung der Ausfallsicherheit eine hohe Zuverlässigkeit gewährleistet. Als Nachteil ist der derzeit noch hohe Kostenanteil (Faktor 5 - 10) gegenüber ETHERNET zu sehen, der aber mit der zunehmenden Verbreitung des FDDI erfahrungsgemäß sinken wird.

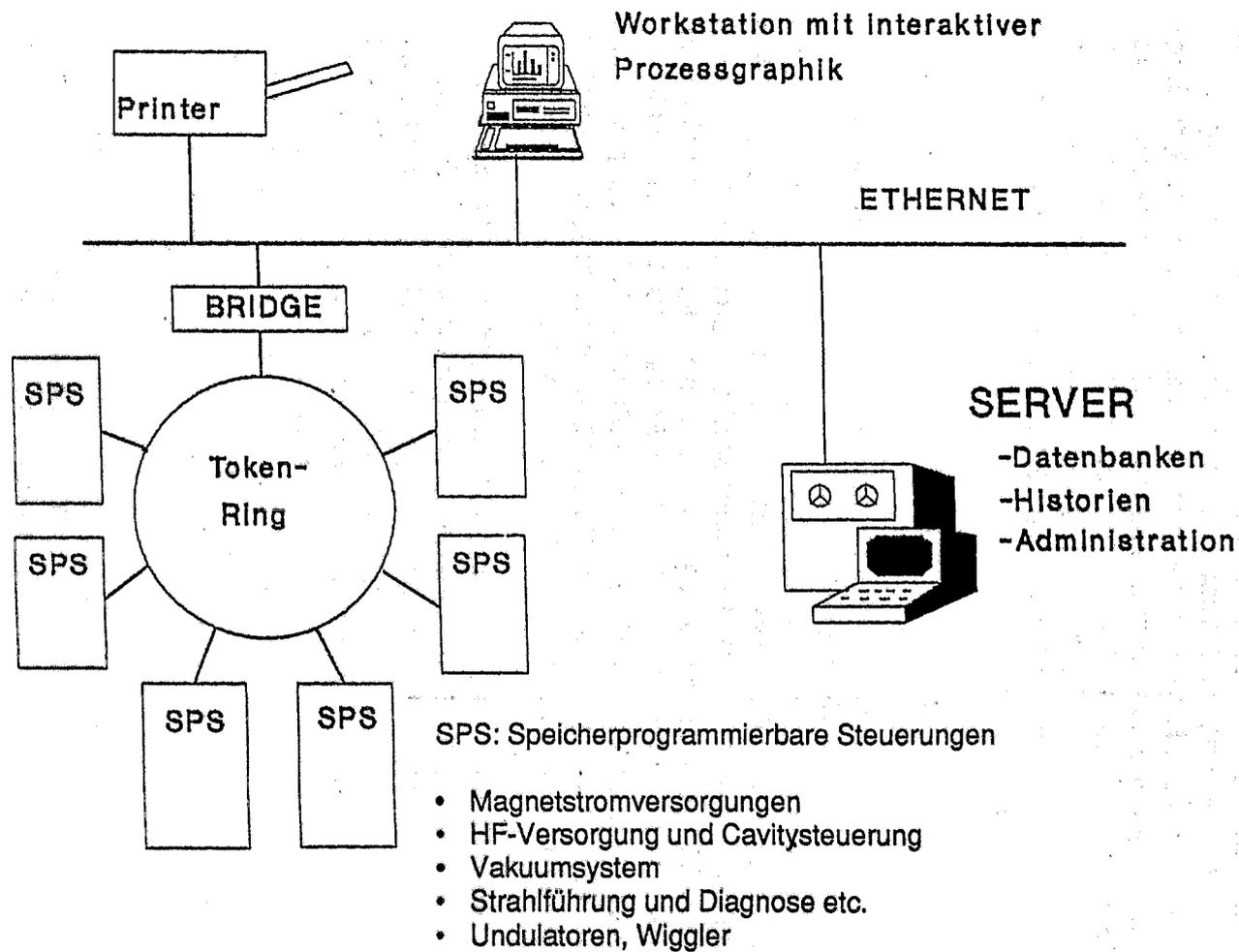
In der maschinennahen Prozeßebene kommen durchweg fernsteuerbare, mit eigenen Prozessoren ausgestattete Knoten zum Einsatz. Diese Knotenrechner beinhalten die für die zugeordneten Teilprozesse notwendigen Steuerprogramme, Gerätedatenbanken und Kommunikationsmodule. Während gegenwärtig für diesen Aufgabenkomplex häufig noch auf dem CAMAC-Standard basierende Knoten im Einsatz sind, sind für künftige Entwicklungen preiswertere und in ihren Leistungsdaten dem CAMAC überlegene Systeme wie der VME-Bus oder ECB-Bus im Gespräch. Für diese Systeme bietet die Industrie eine umfangreiche Palette von leistungsfähigen Modulen, eine Vielzahl davon mit eigenen Prozessoren, an.

Die Prozeßknoten werden untereinander mit einem Prozeß-LAN als Subnetz des FDDI-Backbones gekoppelt. Als ein mögliches Prozeß-LAN findet das ARCnet immer breitere Anwendung. ARCnet (Attached Resource Computer Network) läßt eine gemischte Struktur von Stern- und Bustopologien zu, ist somit auch für Erweiterungen jederzeit offen. Die Industrie bietet für ARCnet verschiedene Verkabelungsarten und die dazu notwendigen Zusatzeinrichtungen an, so daß je nach Erfordernissen Koaxial-, Glasfaser- und Twisted Pair-Leitungen zum Einsatz kommen können. Preiswerte ARCnet-Controller für ECB-Bus-Systeme enthalten neben einer CPU die Kommunikationsschaltkreise COM 9026 und COM 90C32 und realisieren das Token-Passing-Protokoll entsprechend des IEEE 802.5 Standards bis zur Schicht 3 des bereits erwähnten ISO-OSI-LAN-Standards. Obwohl durch die Busverkabelung die Knotenrechner elektrisch parallel liegen, wird durch das Protokoll ein logischer Ring aufgebaut. Das von DATAPOINT lizenzierte Verfahren gestattet nach einer festgelegten Reihenfolge den Stationen die Benutzung des Übertragungsmediums. Daher läßt sich eine von der Anzahl der angeschlossenen Stationen abhängende maximale Antwortzeit bestimmen.

Die Kommunikationssoftware befindet sich resident auf allen Knotenrechnern. Dafür sind derzeit Single-Board-Computer mit dem Prozessor Z-280 vorgesehen, der die Applikationssoftware und die Kommunikationssoftware steuert. Als Software eignet sich eine kommunikationsfähige Version von FORTH, das Open Network FORTH (ONF). Das ONF wird auch am Beschleuniger in Garching eingesetzt, wo auch wesentliche Entwicklungsarbeiten zu diesem System geleistet wurden.

Eine Alternative und/oder Ergänzung zu den beschriebenen Knotenrechnern bieten die speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), die in verschiedenen Ausbaustufen von der Industrie angeboten werden (z. B. SIMATIC von Siemens). Diese eignen sich besonders für Interlock-Testsysteme.

Abb. 30 zeigt die prinzipielle Struktur für das zu entwickelnde Kontroll- und Kommunikationssystem von ROSY. Auf die einzelnen Prozeßknoten wurde in diesem Schema verzichtet.



Kontrollsystem für ROSY © FZR Lindeborn April '92

Abb. 30: Prinzipielle Struktur des Kontrollsystems für den Speicherring ROSY I

5. Injektor

Zum Injektor sind noch keine detaillierten Überlegungen durchgeführt worden, und somit sollen nur allgemeine Gesichtspunkte diskutiert werden. Die Endenergie des Injektors für den Booster Speicherring ROSY I sollte möglichst hoch sein, um die verschiedensten Effekte, die bei kleiner Energie zu geringen Lebensdauern führen, zu umgehen. Aufgrund der Erfahrungen an den verschiedensten Synchrotronstrahlungszentren insbesondere in Madison/Wisconsin und Lund/Schweden sollte die Endenergie des Injektors größer als 200 MeV sein. Für ROSY I wird eine Injektionsenergie von $E_{inj} \geq 300$ MeV gefordert. Dies kann durch 2 Lösungsansätze erfüllt werden:

- Verwendung eines Linearbeschleunigers mit einer Energie von $E = 300$ MeV
- Aufbau eines Synchrotrons mit einer Endenergie um 1 GeV.

Die einfachste - aber wohl auch teuerste - Lösung ist die Verwendung eines 300 MeV-Linearbeschleunigers. Dies ist ein industriell gefertigtes Gerät; entsprechende Injektoren wurden für die ESRF [15], HELIOS [23] und CAMP [24] gebaut. Es liegen auf diesem Gebiet ausreichende Erfahrungen vor. Im folgenden soll jedoch ein Vorschlag unterbreitet werden, der zu einem sehr kompakten Aufbau führt.

Dieser Vorschlag nimmt Bezug auf eine "feasibility study" für einen 200 MeV-Linac von sehr geringer Länge, d. h. mit sehr hohem Beschleunigungsgradienten [25]. Er sieht die Verwendung des sog. SLED (Slac Energy Doubler) - Konzepts vor, das mit einer Speicherung von HF-Energie in Cavities sehr hoher Güte arbeitet, die sehr schnell in die Beschleunigerabschnitte entladen werden. Ein solches System setzt den sog. Burst-Betrieb voraus, d. h. Strompulse von max. 100 ns Dauer. Gegenüber konventionellen Linacs kann die Energie ca. um den Faktor 2 gesteigert werden.

Für ROSY wird dieser Vorschlag insofern abgewandelt, als von geringeren Beschleunigungsgradienten ausgegangen wird, um auf der konservativen Seite zu liegen, wie sie in praktischen Fällen (z.B. DESY) erprobt wurde. Für die Gesamtlänge des Beschleunigers wirkt sich dies in einer entsprechenden Verlängerung aus. Bei einem als sicher beherrschbar geltenden Beschleunigergradienten von 30 MeV/m

kommt man nach Tabelle 8 bei einer Füllzeit von $0.6 \mu\text{s}$, die aus verschiedenen Gründen als günstig anzusehen ist, zu einer optimierten Abschnittslänge von 3.5 m und einem Energiegewinn/Abschnitt von 119.6 MeV , wenn eine Puls-eingangleistung in den Abschnitt von 20 MW vorausgesetzt wird. Dieser Energiegewinn berücksichtigt bereits die Eigenschaften des SLED-Systems und entspricht etwa der "Nullstromenergie", d. h. der Energie bei geringer Strombelastung.

Dieser Fall liegt im Burst-Betrieb mit guter Näherung vor, selbst bei großen Pulsstromamplituden. Im Positronenteil ist dies fast ideal erfüllt, weil der Positronenstrom ca. 1% des Elektronenstromes beträgt. Die Linaclänge läßt sich dann einfach als Summe der Längen des Elektronenteils und des Positronenteils ermitteln. Weitere Division durch die Abschnittslänge ergibt die Anzahl der erforderlichen Beschleunigerabschnitte.

Wichtig für den Betrieb des Linac als Injektor mit Positronen ist eine Aussage über die Konversionsrate. Nach beim DESY vorliegenden Erfahrungen, die sich mit denen anderer Labors decken, ist bei einer Elektronenenergie von $200 - 300 \text{ MeV}$ mit einer e^+/e^- conversion efficiency von ca. 1% zu rechnen. Sie bezieht sich auf das Verhältnis des in 1% Energiebreite enthaltenen Positronenstroms zum gesamten Elektronenstrom. Rechnet man im Burst-Betrieb mit Elektronenströmen von $1 - 2 \text{ A}$, so ergeben sich demnach Positronenströme von $10 - 20 \text{ mA}$. Zu ergänzen ist, daß obige Aussagen zur Energiebreite sich auf Positronenenergien von ca. 300 MeV beziehen. Bei höheren Endenergien ergeben sich etwas günstigere Verhältnisse.

Die Daten für einen 300 MeV -Linac sind in der Tabelle 8 zusammengestellt. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 31 dargestellt.

1. Total system:

No. of sections:	3
Injection:	Perbuncher/ buncher Triode gun 100 kV
Energy gain per section:	103 MeV
No. of klystrons:	20 MW
Section length:	2.5 m
Overall length of machine:	9 m
Section fill time:	0.6 μ s
Total pulse width:	4.5 μ s
Operating frequency:	3 GHz

2. Accelerating structures:

Type:	DLWG
Mode:	$2\pi/3$
Length:	2.5 m
Shunt impedance:	74 M Ω /m
Quality factor:	15200
Fill time:	0.6 μ s
Iris diameter:	18.498 mm
Inner tube diameter:	84.977 mm
Disc thickness:	5 mm
Accelerating gradient, peak:	41.28 MV/m
Peak field at input coupler:	57 MV/m

3. Pulse compression system:

Type:	SLED, 2 storage cavities 3 dB hybrid coupler
Quality factor:	$10^5 - 1.8 \cdot 10^5$
Coupling coefficient:	5 - 10
Loaded cavity fill time:	1.5 μ s

4. Buncher

Type:	Standing or travelling-wave
Acc. gradient:	17.4 MV/m
Length:	0.3 m

Tab. 8: Parameter des 300 MeV Linearbeschleunigers

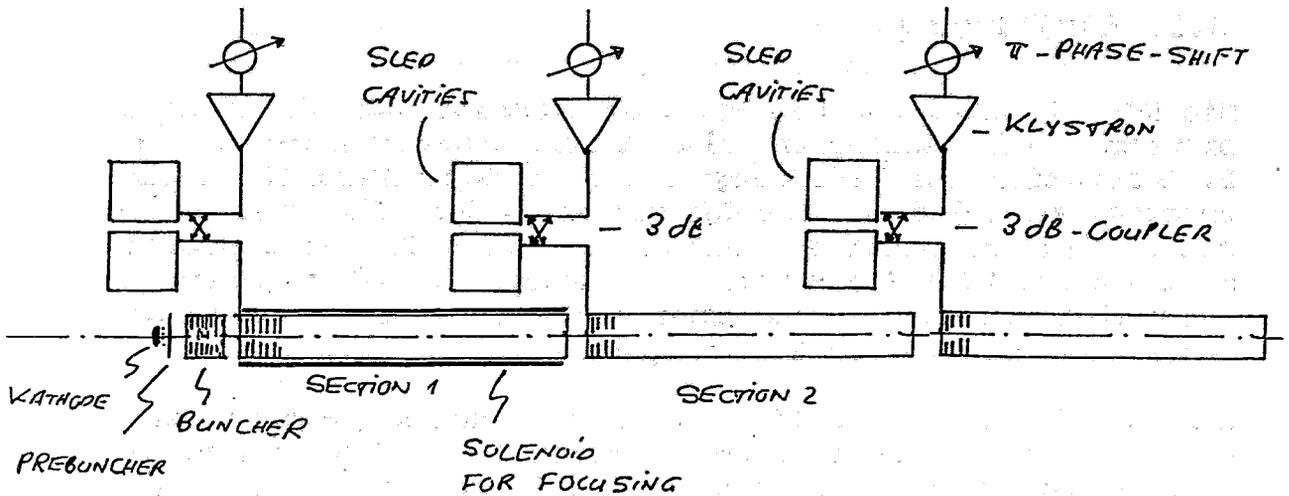


Abb. 31: Schematischer Aufbau des 300 MeV Linearbeschleunigers

In den meisten Synchrotronstrahlungszentren wird als Injektor ein Booster-Synchrotron verwendet. Für ROSY I müßte ein entsprechendes Synchrotron eine Endenergie von 1 GeV haben. Hier bieten sich die in Brookhaven und Daresbury an. Beide Injektoren sind sehr einfach im Aufbau und haben Endenergien um 700 MeV.

Der Linac hat gegenüber dem Synchrotron den Vorteil, daß mit ihm Positronen im Speicherring beschleunigt werden und somit eine relativ hohe Lebensdauer erreicht werden kann. Kostengünstiger scheint jedoch das Synchrotron zu sein.

Detaillierte Untersuchungen zum Injektor werden in naher Zukunft durchgeführt werden.

6. Speicherring ROSY II

6.1. Einführung

Mit ROSY I steht für die Materialforschung und für Arbeiten im mittleren Röntgenbereich eine Synchrotronstrahlungsquelle der 2. Generation zur Verfügung, die in einigen Parametern bereits Anforderungen der dritten Generation genügt. Für viele Untersuchungen in der Material- und insbesondere Grundlagenforschung sind die bei ROSY I erzeugten Brillanzen und Quellengrößen jedoch unzureichend. Für diese Experimente wird eine Quelle der 3. Generation, die es zur Zeit nirgends gibt, benötigt.

Konträr hierzu ist die Situation im VUV- und XUV-Spektralbereich. Hier werden in Europa in den nächsten 5 - 8 Jahren mehrere Maschinen zur Verfügung stehen. Eine Lücke in ganz Europa, ja sogar weltweit, ist eine Synchrotronstrahlungsquelle der 3. bzw. der nächsten Generation für den mittleren Röntgenbereich. Die Anforderungen der Nutzer werden in den nächsten 6 - 10 Jahren wachsen und es wird ein großer Bedarf an Hoch-Brillanz-Maschinen für diesen Spektralbereich vorhanden sein. Dies ist auch in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des "Workshops on the 4th Generation Light Sources" [8].

Bei Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation und auch der nächsten Generation werden die Elektronen bereits mit der Nominalenergie E_0 injiziert. Wie bei den gegenwärtigen Ringen der 3. Generation bedeutet dies, daß ein entsprechender Injektor gebaut werden muß. Mit ROSY I ist ein solcher Injektor vorhanden und somit bietet es sich an, eine entsprechende Synchrotronstrahlungsquelle am Forschungszentrum Rossendorf zu errichten.

Mit den folgenden Überlegungen möchte das Forschungszentrum Rossendorf ein erstes Konzept einer solchen Synchrotronstrahlungsquelle vorstellen. Das darüber hinausgehende Konzept für eine beugungsbegrenzte Synchrotronstrahlungsquelle als eine Möglichkeit für eine Maschine der nächsten Generation ist im Anhang kurz skizziert.

6.2 Magnetstruktur von ROSY II

Eine "high-Brillanz-Maschine" für den weichen und mittleren Röntgenbereich sollte eine Emittanz haben, die kleiner ist als bei den Maschinen der 3. Generation - dediziert für den VUV- und XUV-Bereich. Aufgrund der guten Ergebnisse der modifizierten QBA-Optic [9], die im Verhältnis zur DBA- und TBA-Struktur Emittanzen erzielt, die um den Faktor 3 - 5 kleiner sind; wurde diese Magnetstruktur als Grundlage für erste Rechnungen zum ROSY II-Lattice verwandt.

Die Idee des modifizierten QBA-Lattices ist entsprechend der des MBA-Lattice für ROSY I. Zur Erreichung einer möglichst großen Zahl von Einbauplätzen für Wiggler und Undulatoren wird ein Achromat aus 2 Einheitszellen und 2 Anpassungszellen aufgebaut. Die Ablenkung in den Anpassungszellen ist wieder halb so groß wie die in den Einheitszellen. Weitere Einzelheiten sind den Abschnitten 2.1 und 2.2 zu entnehmen.

Zur Erreichung des gewünschten Verlaufes der $\beta_x(s)$ - und der $\eta_x(s)$ - Funktion in dem Ablenkmagneten muß in der Einheitszelle ein magnetisches Element mit einer fokussierenden und eins mit einer defokussierenden Komponente eingebaut werden. Untersuchungen von Einheitszellen mit einem Doublet-System sind für den Speicherring Delta [11] durchgeführt worden. Ein sehr einfacher Aufbau der Einheitszelle ergibt sich, wenn die Defokussierung des Elektronenstrahles in den Magneten verlegt wird. Die Einheitszelle besteht dann, wie in Abb. 32 wiedergegeben, nur aus zwei magnetischen Elementen: dem Quadrupol und dem Ablenkmagneten.

Durch die Einführung eines Gradienten in den Ablenkmagneten wird die Dämpfungszahl $J_x > 1$ (siehe Gl. (3), (4)) und führt zu einer zusätzlichen Verkleinerung der Emittanz. Die Dämpfungszahl in longitudinale Richtung nimmt jedoch ab: $J_s = 2 + \delta$. Eine entsprechende QBA-Struktur wurde erstmals für den Speicherring LISA in Bonn [12], [9] erarbeitet. Aufgrund der positiven Ergebnisse wird diese Magnetstruktur auch für den Speicherring ROSY II vorgeschlagen.

Das Verhalten der Einheitszelle wird durch die Verläufe der Maschinenfunktionen $\beta_x(s)$, $\beta_y(s)$ und $\eta_x(s)$ bestimmt. In Abb. 33 ist der Verlauf dieser Funktionen innerhalb von zwei Einheitszellen wiedergegeben. Weiterhin sind für die Beschreibung der Einheitszelle Parameter von Bedeutung, die

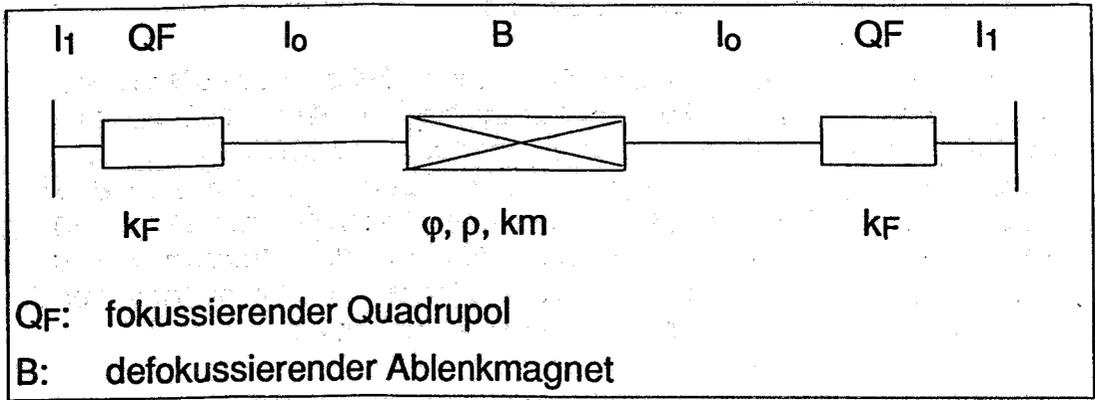


Abb. 32: Magnetstruktur einer Einheitszelle des Speicherringes

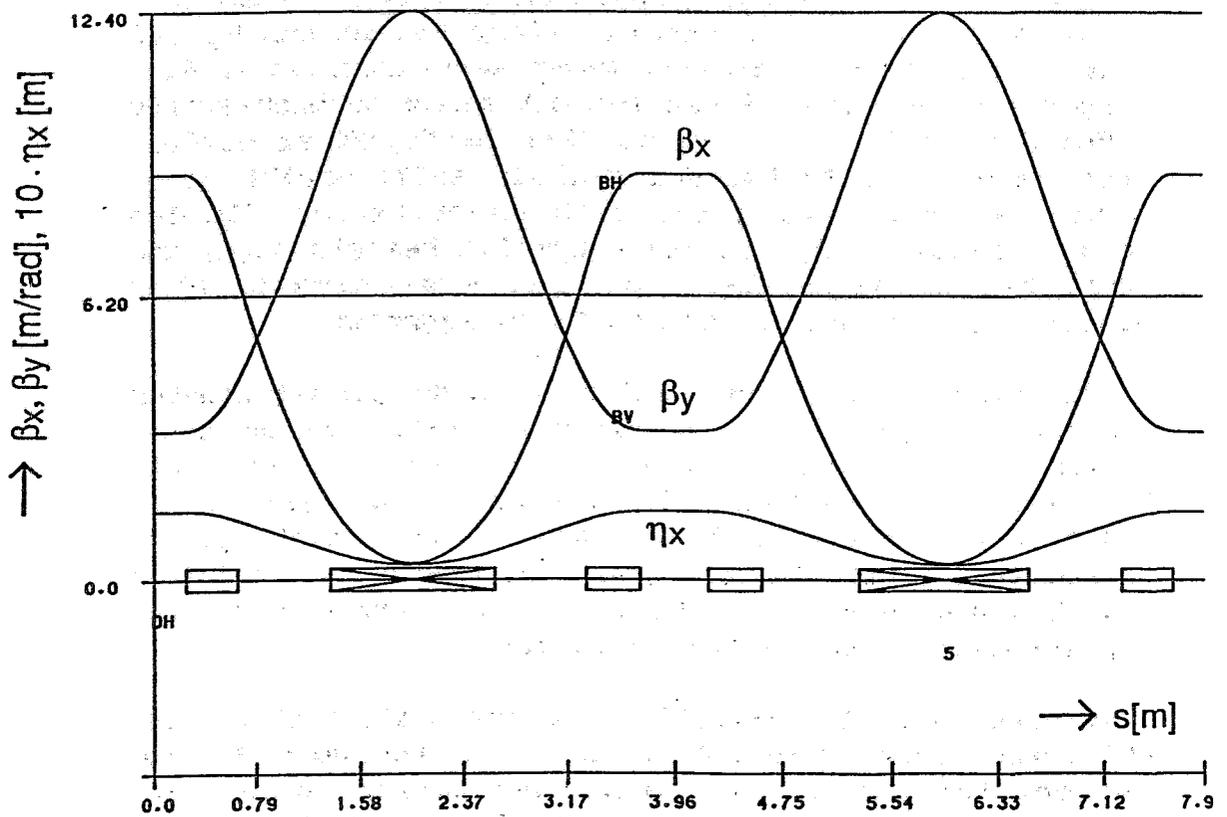


Abb. 33: Verlauf der Maschinenfunktionen β_x , β_y und η_x in einer Einheitszelle des Achromaten vom Speicherring ROSY II.

sich aus dem Verlauf der Maschinenfunktionen errechnen: Emittanz ϵ_x , Dämpfungszahl D , Arbeitspunkte Q_x und Q_y sowie die Chromatizitäten ξ_x und ξ_y . Der Verlauf dieser Funktionen ist in Abb. 34 und 35 dargestellt und zwar in Abhängigkeit der Stärke k_f des fokussierenden Quadrupols. In den Abbildungen sind als Parameter gewählt: der Gradient im defokussierenden Magneten k_m und der Abstand l_0 zwischen Quadrupol und Ablenkmagnet (siehe Abb. 32). Die in den Abb. 34 und 35 aufgetragenen Größen wurden für einen Speicherring bestehend aus 36 Einheitszellen berechnet.

Die Emittanz durchläuft bei einer bestimmten Quadrupolstärke k_f ein Minimum und steigt nach dem Durchlaufen des Minimums steil an. Das Minimum ist dabei nicht abhängig von dem Gradienten im Ablenkmagneten (Abb. 34.a). Wird der Abstand zwischen Magnet und Quadrupol verändert, so verschiebt sich selbstverständlich die Lage des Minimums. Die Emittanz an der Stelle des Minimums ändert sich jedoch nicht (Abb. 34.b). Bei hohen Quadrupolstärken k_f ergeben sich keine Lösungen, weil die β_x -Funktion sehr große Werte einnimmt, und somit ist der Stabilitätsbereich der Einheitszelle bei zu hohen k_f -Werten eingeschränkt. ($k_f > 1.62 \text{ m}^{-2}$)

Die Synchrotronschwingungen sind nicht mehr gedämpft, und der gespeicherte Strahl geht verloren, wenn die Dämpfungszahl D (Abb. 34.c und 34.d) kleiner als -2.0 wird. Für die Einheitszelle von ROSY folgt hierdurch ein stabiler Bereich für Quadrupolstärken $1.2 \leq k_f \leq 1.6$. Der stabile Bereich ist im geringen Umfang eine Funktion des Abstandes l_0 zwischen Magnet und Quadrupol und dem Gradienten k_m im Magneten.

Der Arbeitspunkt der Einheitszelle in X-Richtung ist in erster Näherung durch k_f und in Y-Richtung durch den Gradienten k_m im Ablenkmagneten bestimmt. Eine Abstandsveränderung hat eine Auswirkung auf den Arbeitspunkt in beiden Richtungen (Abb. 35.a und 35.b). Auffallend bei diesen Darstellungen ist, daß sich mit dem Abstand l_0 sowohl die Lage der minimalen Emittanz als auch der Q_x -Wert ändert. Die Auswertung ergibt, daß zur minimalen Emittanz immer derselbe Q_x -Wert gehört. Eine Längenveränderung von l_0 führt bei gleicher Emittanz zu einer Arbeitspunktverschiebung in Y-Richtung.

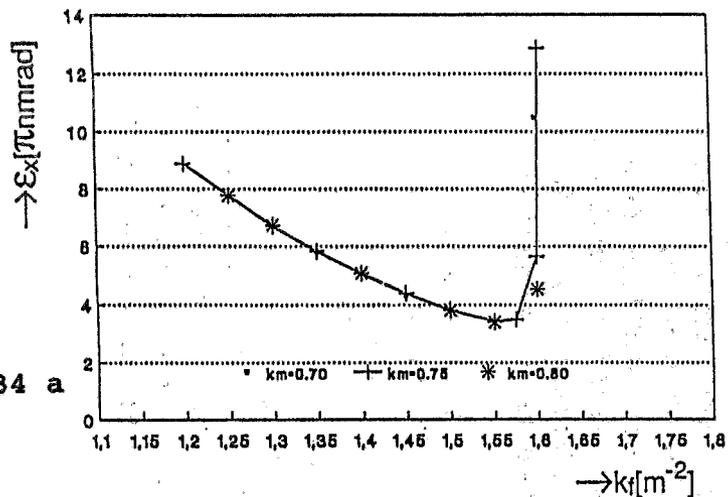


Abb. 34 a

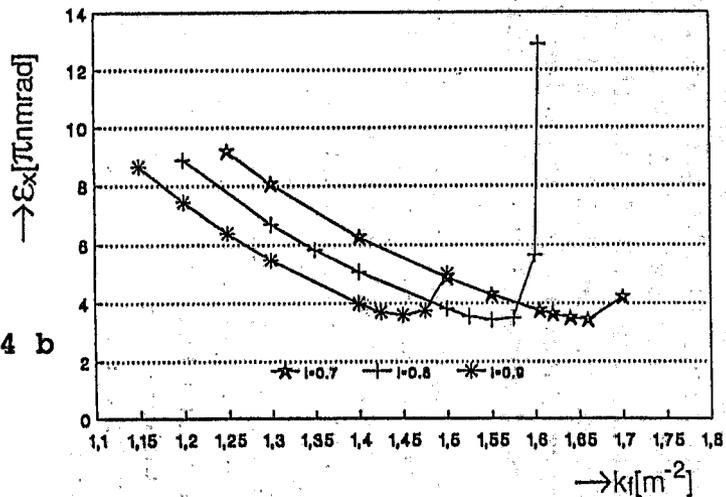


Abb. 34 b

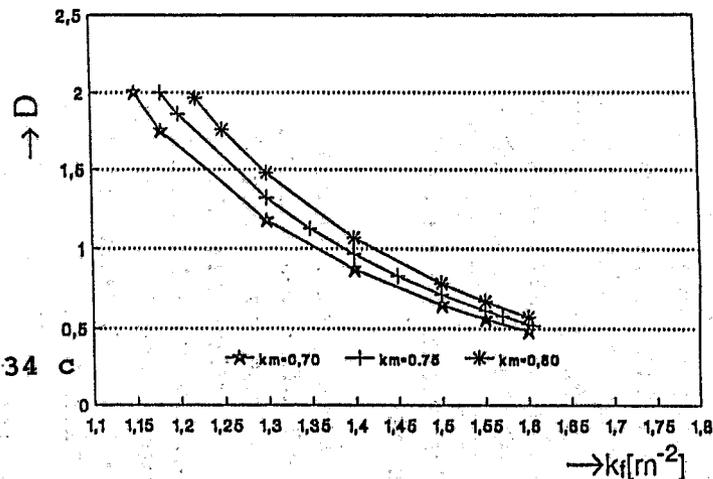


Abb. 34 c

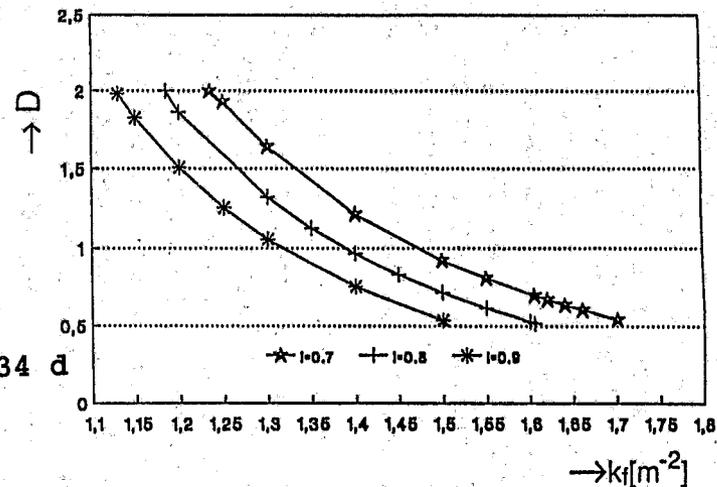


Abb. 34 d

Abb. 34.: Abhängigkeit der Emittanz und der Entdämpfungskonstanten D in der Einheitszelle von der Stärke des fokussierenden Quadrupols k_f . Als Parameter sind gewählt: Quadrupolstärke k_m im Ablenkungsmagneten und Abstand l zwischen Quadrupol und Ablenkungsmagnet.

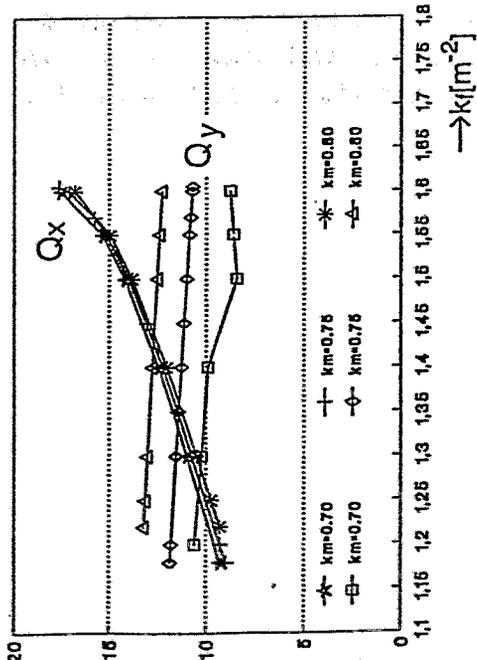


Abb. 35 a

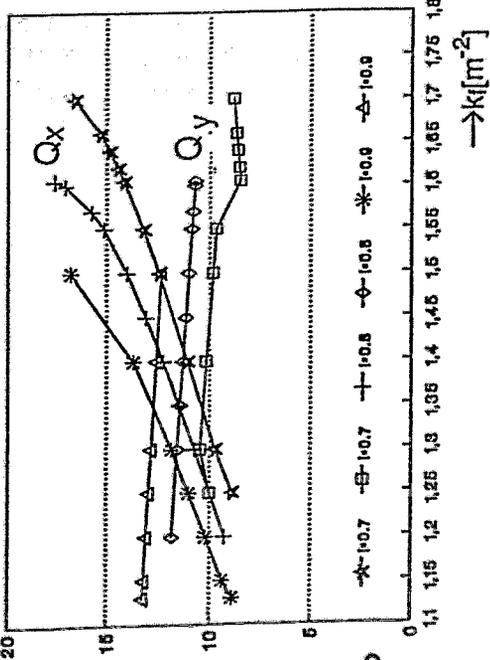


Abb. 35 b

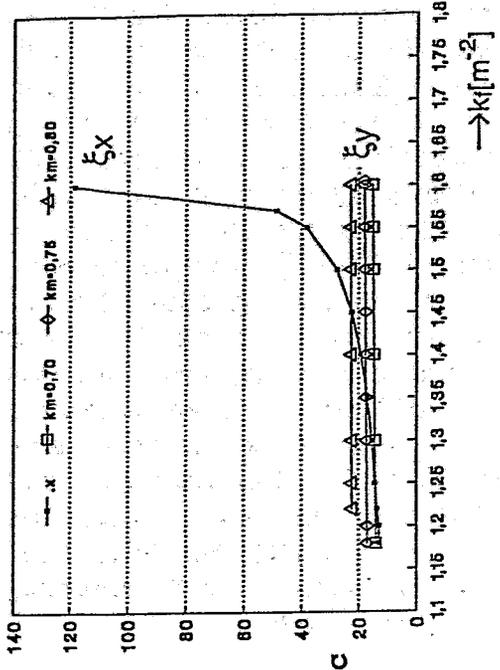


Abb. 35 c

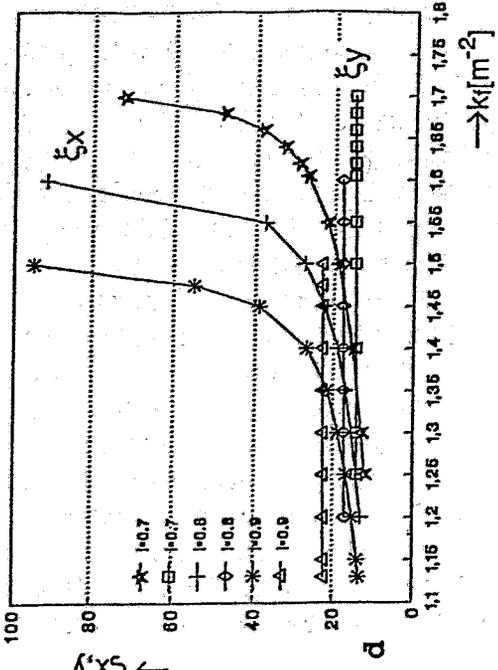


Abb. 35 d

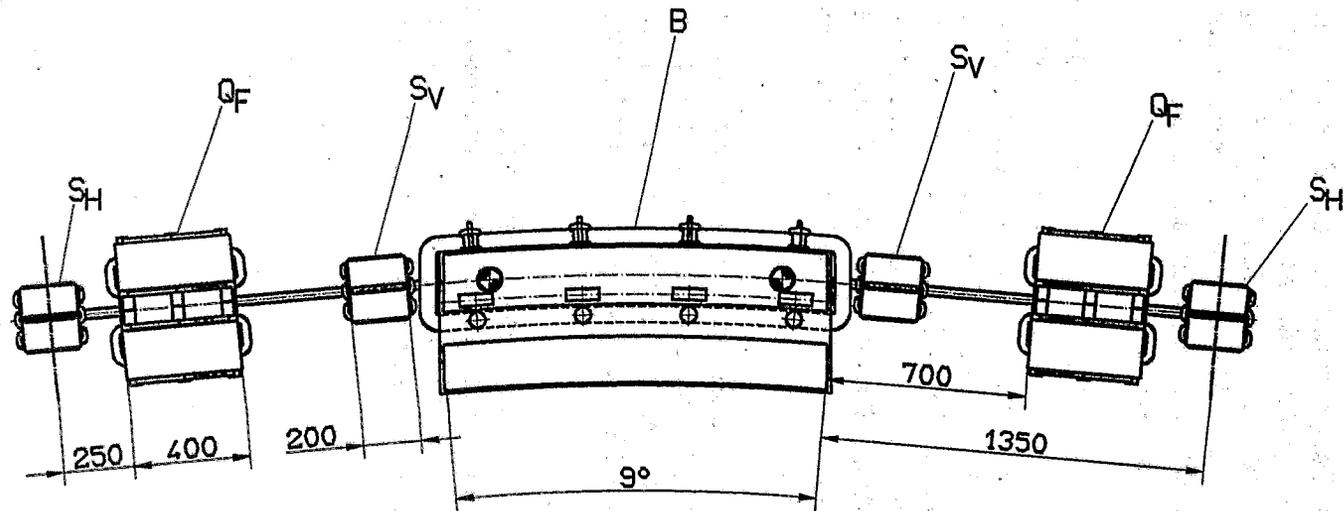
Abb. 35:

Abhängigkeit der Arbeitspunkte Q_x und Q_y sowie der Chromatizität ξ_x und ξ_y in der Einheitszelle von der Stärke des fokussierenden Quadrupols k_f . Als Parameter sind gewählt: Quadrupolstärke k_m im Ablenk magneten und Abstand l_0 zwischen Quadrupol und Ablenk magneten.

Die Chromatizität in X-Richtung ist bestimmt durch die Stärke des fokussierenden Quadrupols und die in Y-Richtung durch den Gradienten im defokussierenden Ablenkmagneten (siehe Abb. 35.a u. .35b). Während die Chromatizität in Y-Richtung unabhängig von k_f ist, wird ξ_x mit zunehmenden k_f -Werten nach dem Durchlaufen des Minimums der Emittanz sehr groß. (siehe Abb. 35.a u. 35.b). Für k_f -Werte, die zu einer Emittanz $\epsilon > \epsilon_{\min}$ führen, ändert sich die Chromatizität ξ_x nur unwesentlich. In diesem Bereich haben ξ_x und ξ_y in etwa gleiche Werte. Für die minimalen Emittanzen ergeben sich Chromatizitäten um den Faktor 50, die für Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation typisch sind. Diese sollten noch zu vernünftigen dynamischen Aperturen führen. Eine detaillierte Auswertung zur Chromatizität ergibt, daß in Abhängigkeit vom Abstand l_0 zwischen Quadrupol und Magnet zu jeder minimalen Emittanz die selbe Chromatizität ξ_x gehört. Mit der Variation der Länge l_0 kann lediglich die Chromatizität in Y-Richtung (bei beibehaltener Emittanz) verändert werden.

Die magnetische Auslegung einer Einheitszelle ist in Abb. 36 wiedergegeben. Die für die Chromatizitätskompensation notwendigen Sextupole werden links und rechts vom Ablenkmagneten (S_y) bzw. am Anfang und Ende der Einheitszelle (S_h) positioniert. Dies sind optimale Positionen, denn die Differenz zwischen den Amplitudenfunktionen in X- und Y-Richtung ist an diesen Stellen maximal. (siehe Abb. 33)

ROSY II 3.2 GeV EINHEITSZELLE



B : ABLENKMAGNET 9 GRAD
 $R_0 = 8000$
 $B_0 = 1.33 \text{ T}$
 $\rho_D = 42.752$

QF : FOKUSSIERENDE QUADRUPOLE
SV : SEXTUPOL (VERTIKAL)
SH : SEXTUPOL (HORIZONTAL)

FZR

FHO

Abb. 36: Anordnung der Magnete in einer Einheitszelle von ROSY II

6.3 ACHROMAT DES SPEICHERRINGES ROSY II

Das Verhalten des Speicherringes soll durch die Einheitszellen bestimmt werden. Bereiche, die zu einer Abweichung führen, sind die Anpassungszellen, die benötigt werden, um die Maschinenfunktionen der Einheitszelle an die gewünschten Bedingungen in den langen geraden Stücken anzupassen. Um den Einfluß der Anpassungszellen relativ gering zu halten und die Struktur der Einheitszelle dem Speicherring aufzuprägen, wird ein Achromat aus zwei Einheitszellen und zwei Anpassungszellen aufgebaut.

Für die Anpassung der $\beta_x(s)$, $\beta_y(s)$ - und der $\eta(s)$ -Funktion an die gewünschten Werte am Ort der ID's werden insgesamt 5 Quadrupole benötigt. Drei in den geraden Strecken zur Anpassung der Betatronfunktion und zwei zwischen der Einheitszelle und dem kurzen Ablenkmagneten zur Anpassung der Dispersionsfunktion. Die Anordnung der Magnete in den Anpassungszellen und im Bereich der Undulatoren/Wiggler sind in den Abbildungen 37 und 38 dargestellt. Für die Insertion Devices steht eine Einbaulänge von maximal 6m zur Verfügung. (siehe Abb. 39)

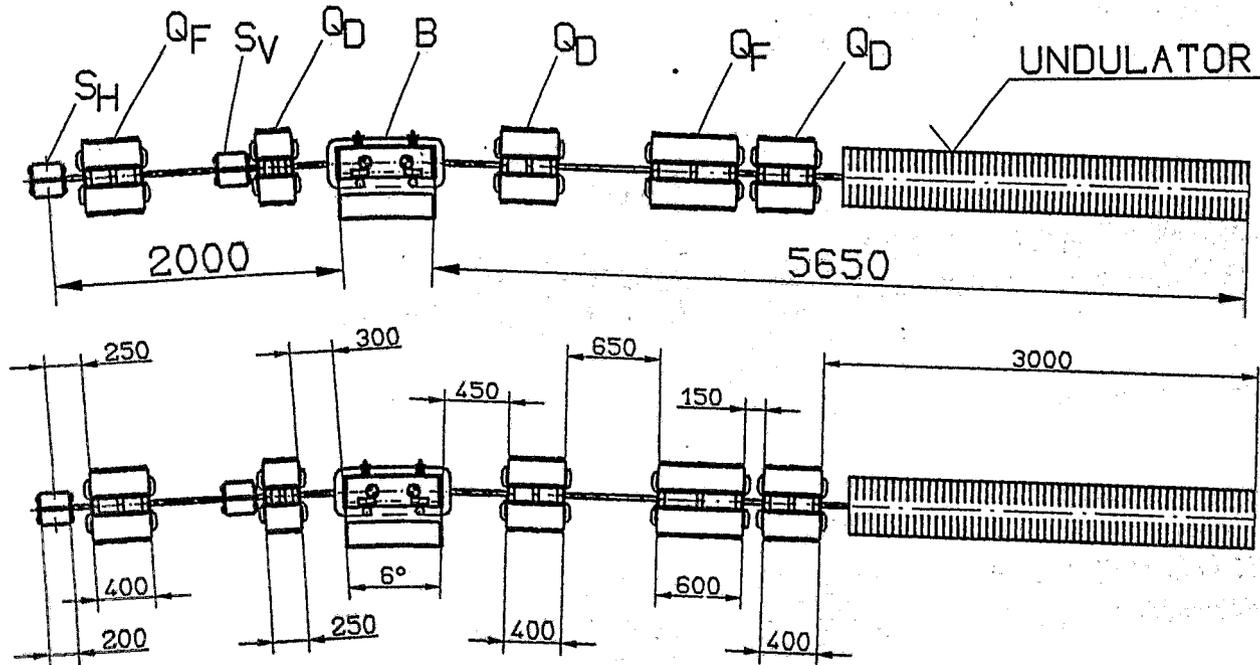
Für den Betrieb mit Undulatoren bzw. Wigglern werden unterschiedliche Bedingungen benötigt, und somit werden auch verschiedene Anpassungszellen verwendet. Anpassungszelle U für den Undulatorenbetrieb und Anpassungszelle W für den Wigglerbetrieb. (siehe Abbildungen 37 und 38)

Der sich aus den Einheits- und den Anpassungszellen ergebende Achromat und die aus zwei Achromaten zusammengesetzte Zelle des Speicherringes sind in den Abbildungen 40 und 41 wiedergegeben. Der mittlere Durchmesser des Speicherringes ROSY II beträgt 90m.

Wird im Speicherring ROSY II eine gerade Strecke für die Injektion und eine für die Hochfrequenz-Cavities vorgesehen, so verbleiben noch 10 weitere für den Einbau von Undulatoren und Wigglern. Weiterhin ist es sinnvoll, an 28 von insgesamt 48 vorhandenen Magneten Strahlrohre für die Nutzung der Synchrotronstrahlung anzubringen.

Bei den ersten Berechnungen für den Speicherring ROSY II wurde davon ausgegangen, daß in allen geraden Stücken dieselben β_x , β_y -Verläufe vorhanden sind, d. h. es wurde nicht zwischen Undulator- und Wiggleranpassung unterschieden. Die Verläufe der $\beta_x(s)$, $\beta_y(s)$ - und $\eta_x(s)$ -Funktion in einem Achromaten für diesen Fall ist in Abb. 43 dargestellt. Bei einer Emittanz von $\epsilon_x = 3 \pi \text{nmrad}$ und $\epsilon_y = 0,3 \pi \text{nmrad}$ ergeben sich in den Magneten Querschnitte des gespeicherten Elektronenstrahls von $\sigma_x \approx \sigma_y \approx 0,04 \text{ mm} \approx 40 \mu\text{m}$ (siehe Abb.41)

ROSY II 3.2 GeV ANPASSUNGSZELLE-U



ELEMENTE:
=====

B : ABLENKMAGNET 6 GRAD
 $R_0 = 8000$
 $B_0 = 1.33 \text{ T}$
 $N_D = 42.752$

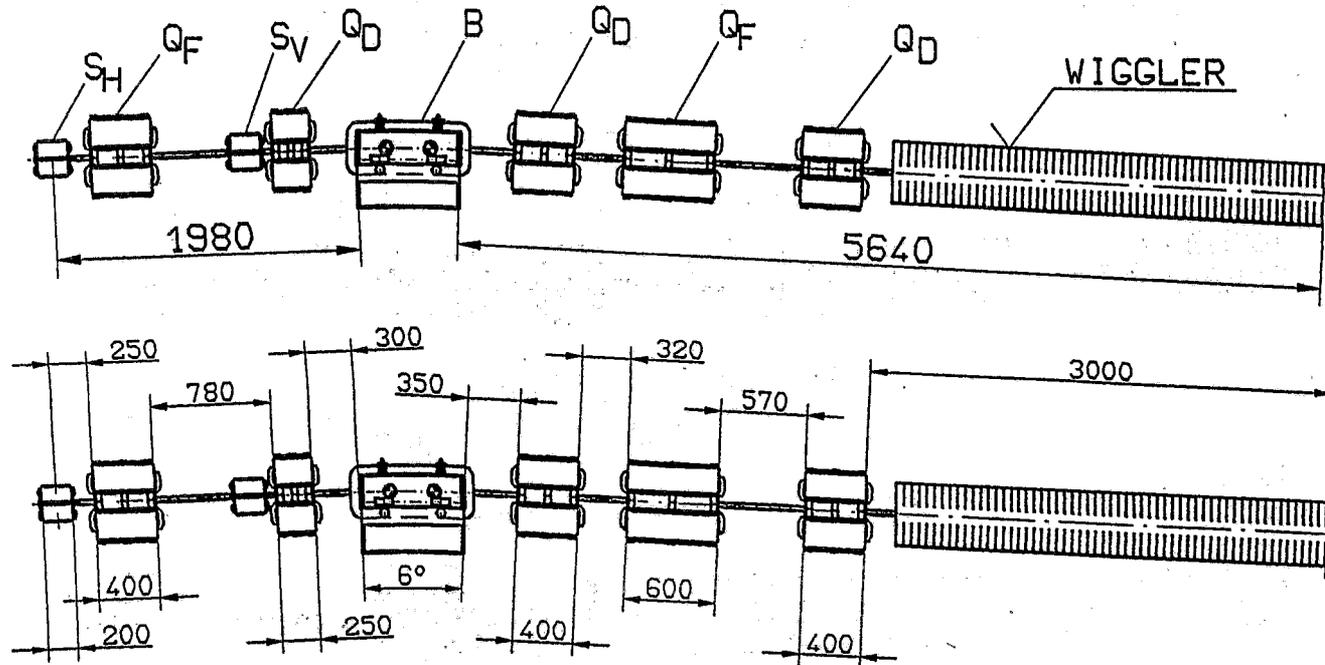
QF : FOKUSSIERENDE QUADRUPOLE
 QD : DEFOKUSSIERENDE QUADRUPOLE
 SV : SEXTUPOL (VERTIKAL)
 SH : SEXTUPOL (HORIZONTAL)

FZR

FHO

Abb. 37: Anordnung der Magnete in der Anpassungszelle für den Undulatorenbereich (U)

ROSY II 3.2 GeV ANPASSUNGSZELLE-W



ELEMENTE:
=====

B : ABLENKMAGNET 6 GRAD
 $R_0 = 8000$
 $B_0 = 1.33 \text{ T}$
 $N_D = 42.752$

Q_F : FOKUSSIERENDE QUADRUPOLE
 Q_D : DEFOKUSSIERENDE QUADRUPOLE
 S_V : SEXTUPOL (VERTIKAL)
 S_H : SEXTUPOL (HORIZONTAL)

FZR

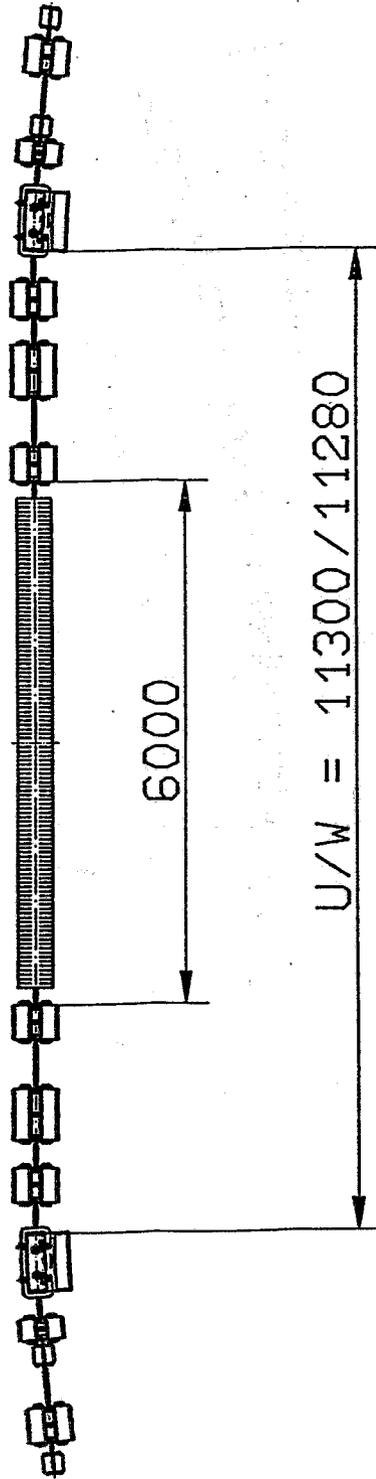
FHO

II-64

Abb. 38: Anordnung der Magnete in der Anpassungszelle für den Wigglerbereich (W)

ROSY II 3.2 GeV

UNDULATOR/WIGGLER - BEREICH

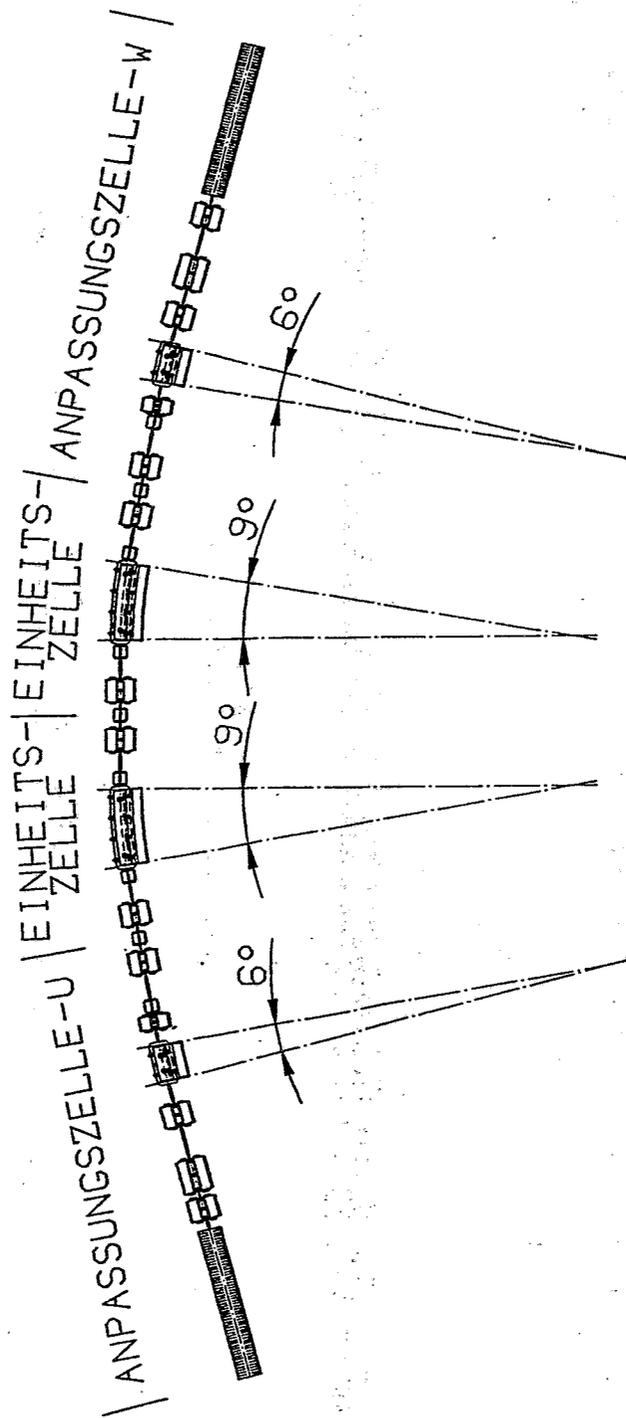


FZR

FHO

Abb. 39: Platzbedarf für den Einbau von Wigglern und Undulatoren

ROSY II 3.2 GeV ACHROMAT

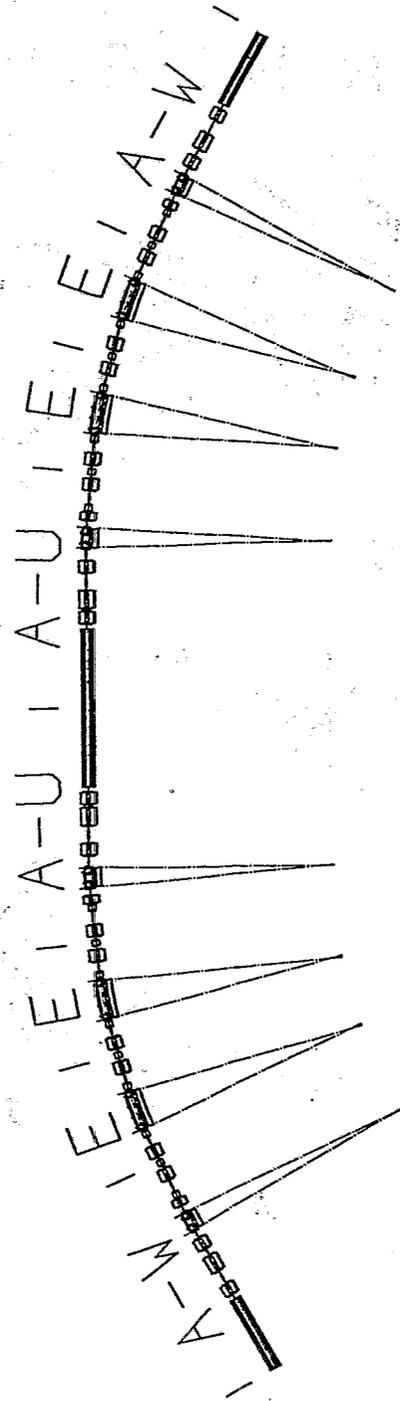


FZR

FHO

Abb. 40: Achromat von ROSY II aufgebaut aus Einheits- und Anpassungszellen für den Undulator- und Wigglerbereich

ROSY II 3.2 GeV ZELLE



- A-W : ANPASSUNGSZELLE-WIGGLER
- A-U : ANPASSUNGSZELLE-UNDULATOR
- E : EINHEITSZELLE

FZR

FHO

Abb. 41: Zelle des Speicherringes ROSY II zusammengesetzt aus zwei Achromaten optimiert für den Undulator(A-U) und den Wigglerbetrieb (A-W)

ROSY II RING 3.2 GeV

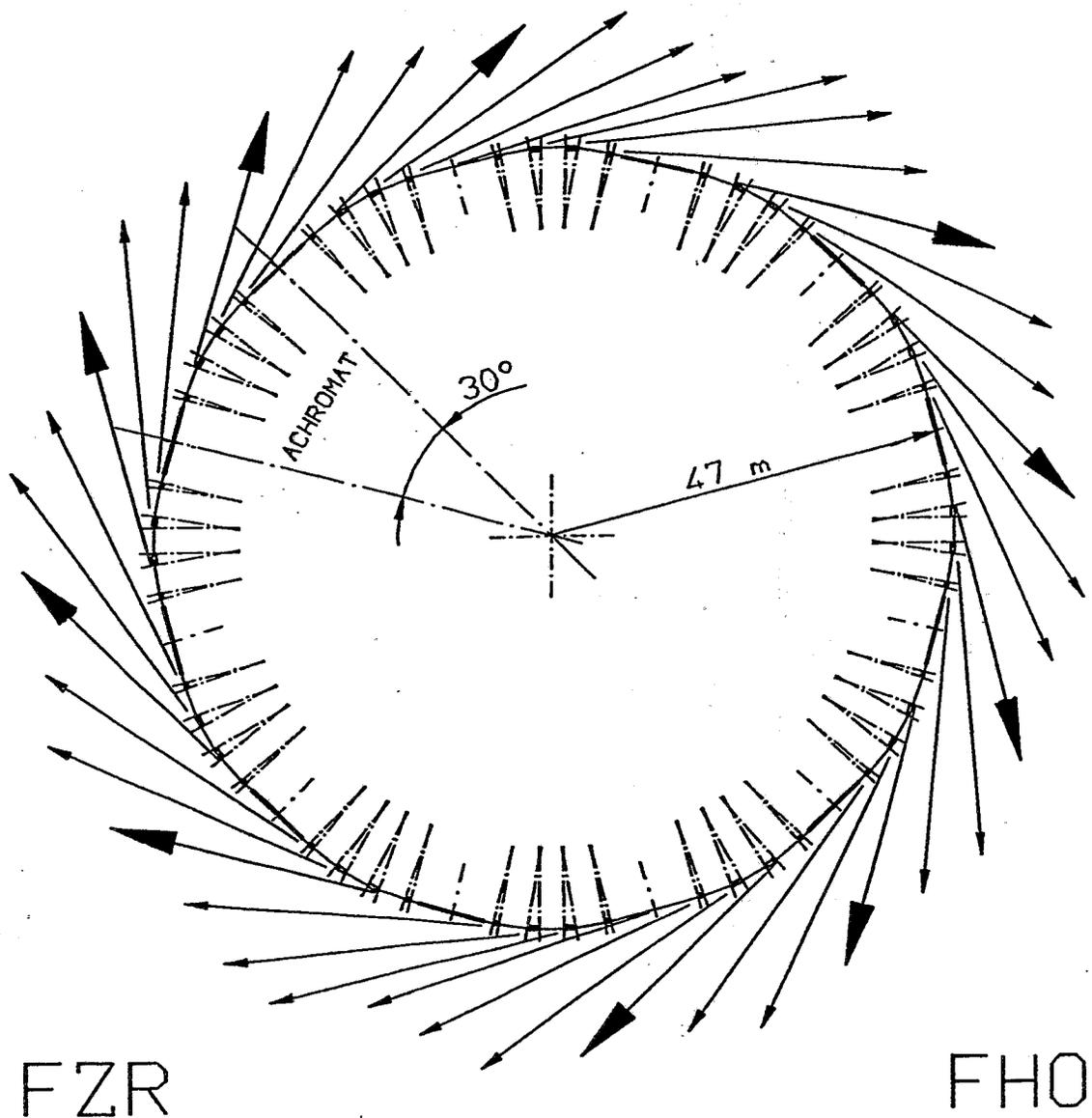


Abb. 42: Speicherring ROSY II zusammengesetzt aus 6 Zellen bzw. 12 Achromaten. Die möglichen Strahlrohre von den Insertion Devices sind mit großen Pfeilen (insgesamt 10) und von den Ablenkmagneten mit kleinen Pfeilen (28) gekennzeichnet.

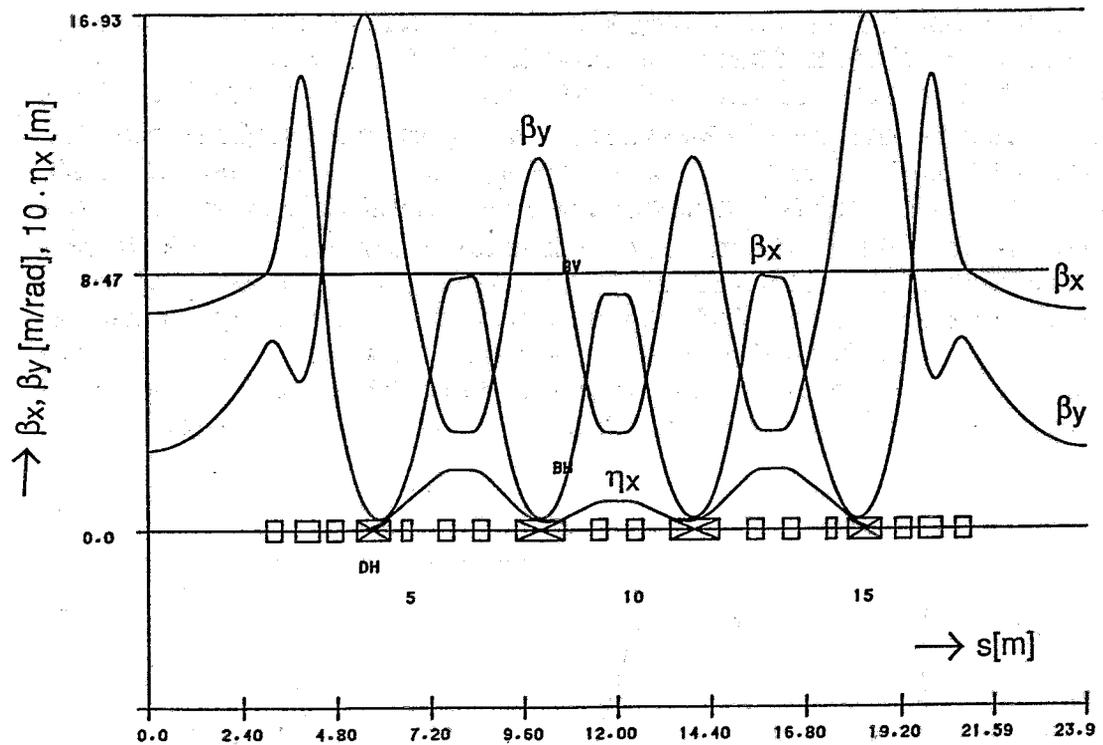


Abb. 43: Verlauf der Betatron- und Dispersionsfunktion in einem Achromaten von ROSY II

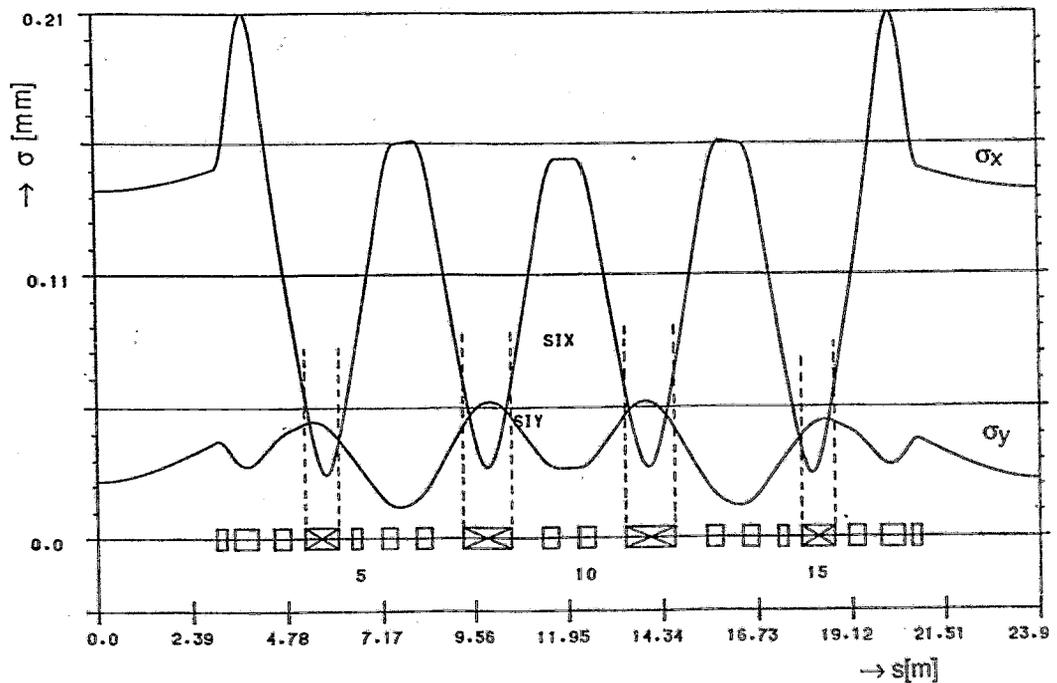


Abb. 44: Querschnitte ($10x$ und $10y$) des gespeicherten Elektronenstrahles im Speicherring ROSY II

Das Verhalten des Speicherringes bei der modifizierten QBA-Struktur ist durch die Einheitszelle bestimmt. Dies zeigt sich aus dem Vergleich der Abb. 33 und Abb. 45. In Abb. 33 ist der Verlauf der $\beta_x(s)$ -, $\beta_y(s)$ - und $\eta_x(s)$ -Funktionen von 2 Einheitszellen und in Abb. 45 der entsprechende Verlauf innerhalb eines Achromaten wiedergegeben. Der Unterschied zwischen beiden Darstellungen ist minimal. Weiterhin ist die Emittanz des Speicherringes $\epsilon_{x0} = 3.43 \pi \text{ nmrad}$ und die eines Speicherringes, nur aufgebaut aus Einheitszellen, fast gleich. Dies bedeutet, daß die Beiträge der Anpassungszellen zu den Emittanzen vernachlässigbar sind und das Verhalten des Speicherringes durch die Einheitszellen gegeben ist. Dies ist ein Vorteil der QBA-Struktur, bei der TBA-Struktur ist dies nicht gegeben.

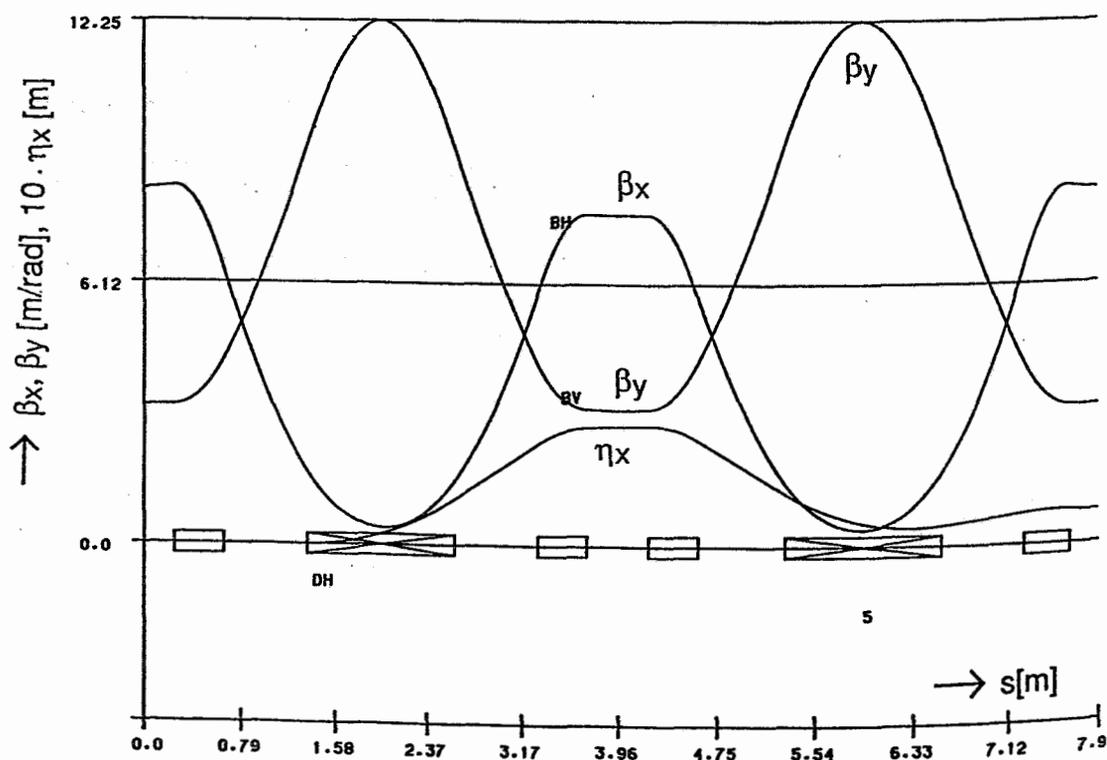


Abb. 45: Verlauf der $\beta_x(s)$, $\beta_y(s)$ - und $\eta_x(s)$ -Funktionen innerhalb von zwei Einheitszellen im Achromaten des Speicherringes ROSY II

Die Arbeitspunkte für den Speicherring ROSY und für einen Achromaten sind in Abb. 46 dargestellt. Die Variation des Arbeitspunktes in einem Achromaten ist eingeschränkt; für den Gesamtring sind jedoch relativ große Verschiebungen möglich. Die Einschränkung des Arbeitspunktes des Achromaten ist durch die Einheitszelle gegeben. Mit anderen Parametern der Einheits-

zelle kann auch ein anderer Arbeitspunkt gewählt werden. Eine Änderung der Arbeitspunkte wurde jedoch nicht für notwendig gehalten, da sich eine ausreichend große dynamische Apertur ergibt.

Der Arbeitspunkt $Q_x = 21,8148$ und $Q_y = 8,7747$ liegt in der Nähe der Resonanzen: $Q_x + 3Q_y = 4 \times 12$, $3Q_x - 2Q_y = 4 \times 12$ und $4Q_x - Q_x = 1 \times 12$, $5Q_x = 9 \times 12$, $30Q_x = 55 \times 12$, $3 Q_x = 4 \times 12$.

Alle anderen zu vermeidenden Resonanzen:

2. Ordnung	3. Ordnung	4. Ordnung
$2 Q_x = N \cdot P$	$3 Q_x = N \cdot P$	$4 Q_x = N \cdot P$
$2 Q_z = N \cdot P$	$3 Q_z = N \cdot P$	$4 Q_z = N \cdot P$
$Q_x - Q_z = N \cdot P$	$Q_x + 2 Q_z = N \cdot P$	$2 Q_x + 2 Q_z = N \cdot P$
$Q_x + Q_z = N \cdot P$	$Q_x - 2 Q_z = N \cdot P$	$2 Q_x - 2 Q_z = N \cdot P$
$-Q_x + Q_z = N \cdot P$	$2 Q_x + Q_z = N \cdot P$	$3 Q_x + Q_z = N \cdot P$
		$Q_x + 3 Q_z = N \cdot P$
N = ganze Zahl, P = Periodizität		

besitzen einen genügenden Abstand von dem in Abb. 46 dargestellten Arbeitspunkt.

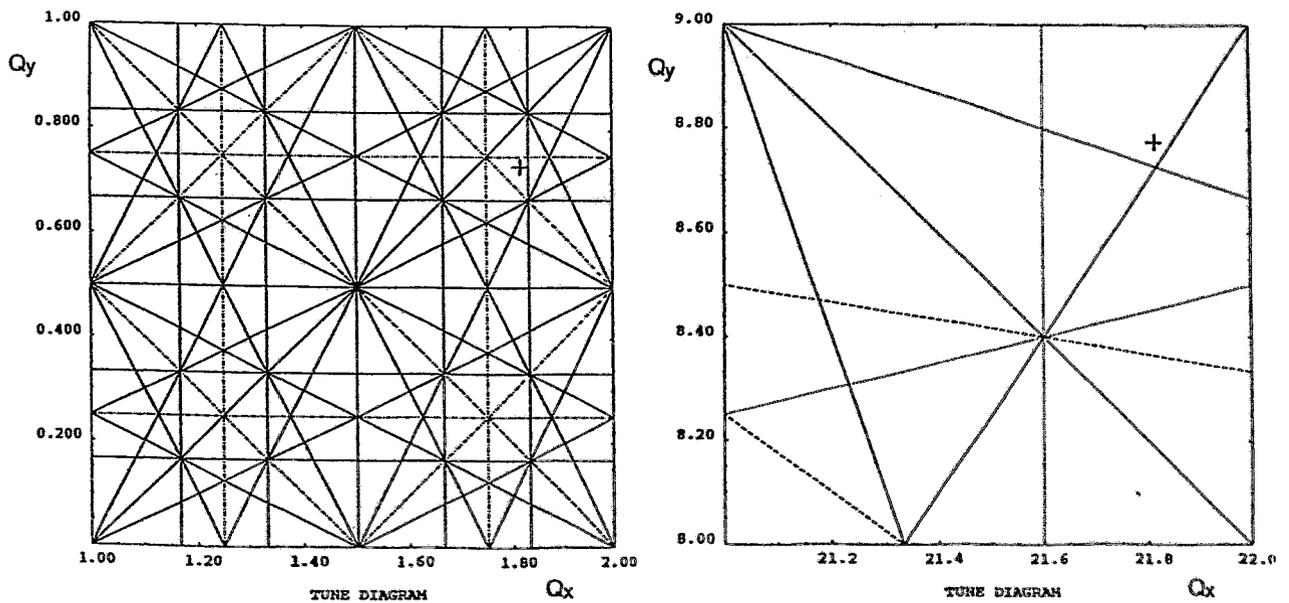


Abb. 46: Arbeitspunkte des Speicherringes ROSY II
a) für den Achromaten und
b) für den gesamten Speicherring

Die dynamische Apertur (siehe Abb. 47) ist mit den Werten $|x| \leq 12$ mm und $|y| \leq 10$ mm ausreichend. Diese Werte müssen jedoch im Zusammenhang mit den Strahldimensionen gesehen werden und zwar bei einer Kopplung $k = 1.0$. In diesem Fall sind die Strahlquerschnitte in den langen geraden Strecken: $\sigma_x = 0.11$ mm und $\sigma_y = 0.067$ mm. Die dynamische Apertur ausgedrückt in Strahldimensionen ist somit: $|x| \leq 110 \sigma_x$ und $|y| \leq 150 \sigma_y$. Dies sind relativ große Werte. Durch Einfügen einer weiteren Sextupolfamilie sollte die dynamische Apertur, wie bei den geplanten Maschinen der 3. Generation auch, wesentlich erhöht werden können.

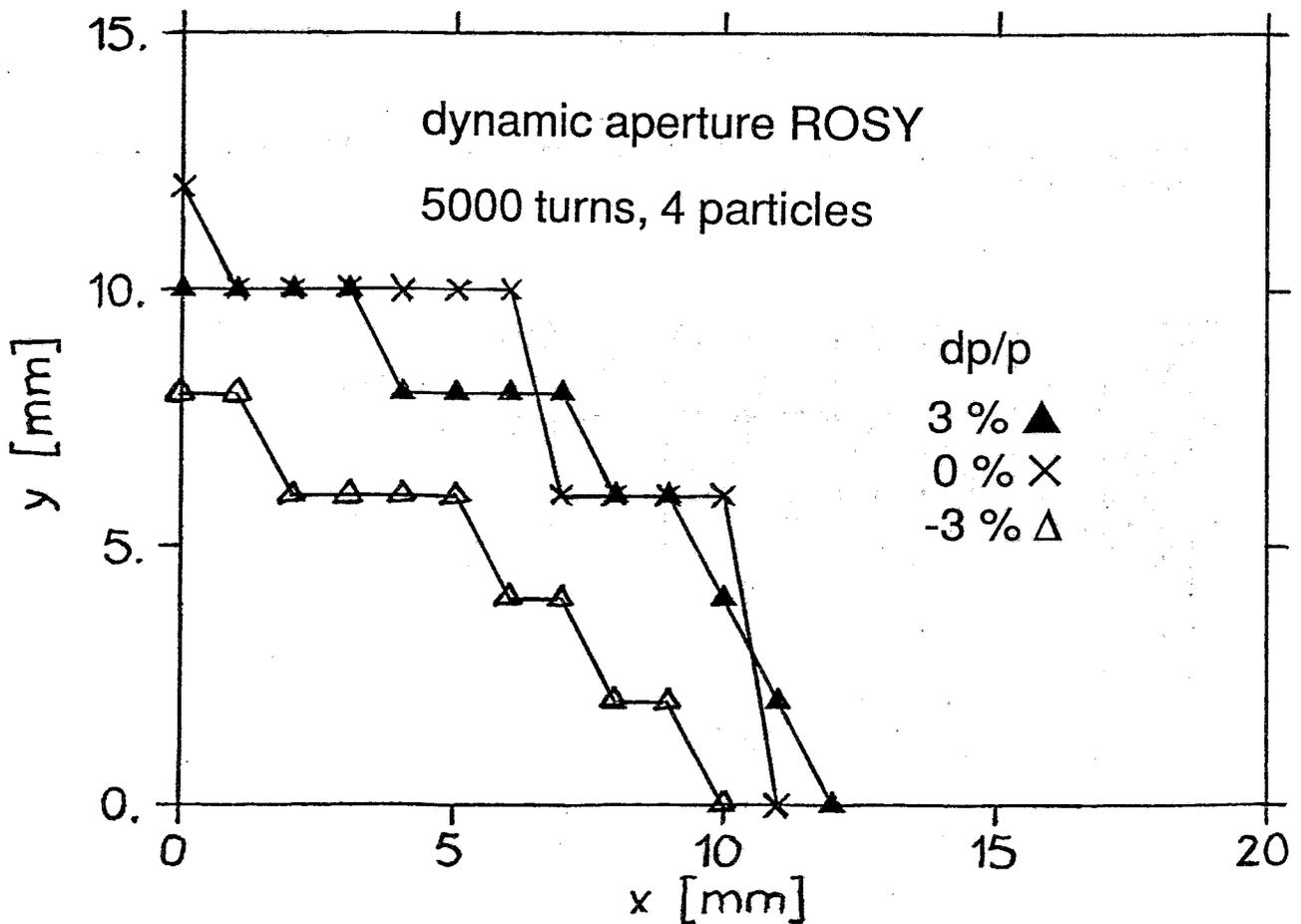


Abb. 47: Dynamische Apertur des Speicherringes ROSY II für die Normalenergie E_0 und Energieabweichungen von $\pm 3\%$. Die Rechnungen wurden mit RACETRACK durchgeführt.

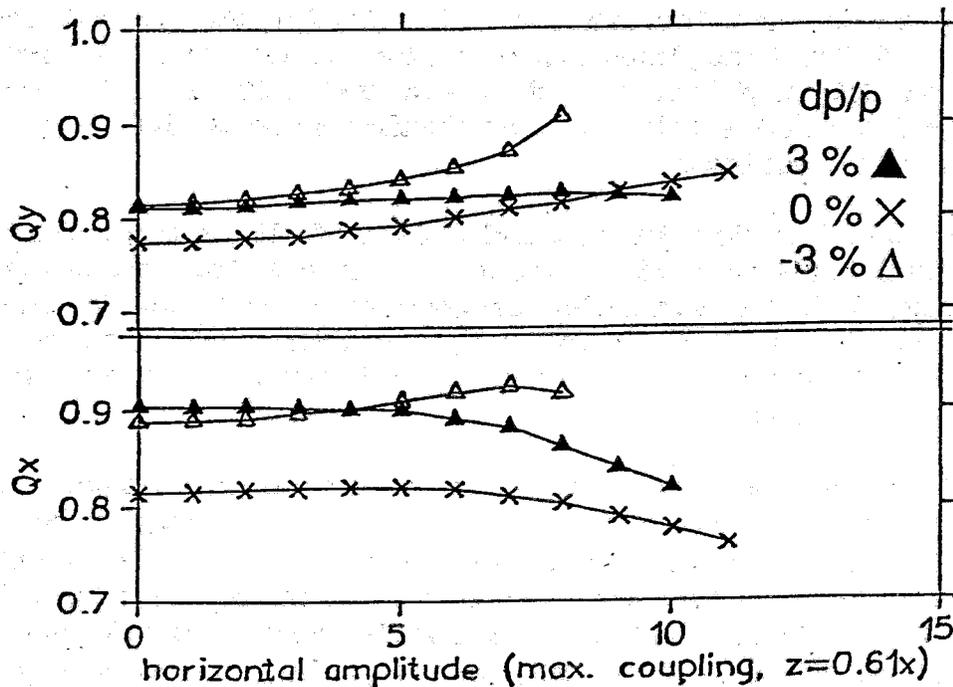


Abb. 48: Veränderung der Arbeitspunkte Q_x und Q_y mit der Amplitude der Betatronschwingungen

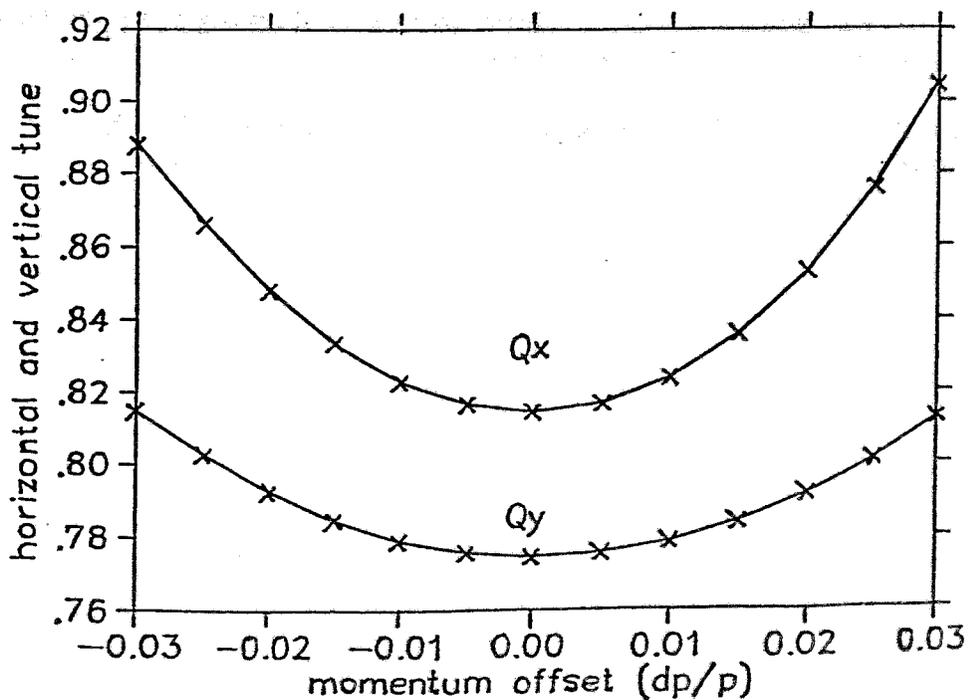


Abb. 49: Abhängigkeit der Arbeitspunkte Q_x und Q_y von der Energieabweichung $\Delta P/P$

Die Änderungen der Arbeitspunkte mit der Amplitude der Betatronschwingung und der Energieabweichung sind in den Abb. 48 und 49 wiedergegeben. Mit Amplituden > 10 mm und auch mit einem Momentumoffset von ± 3 % werden keine Resonanzlinien überschritten und der Strahl geht nicht verloren.

Bei der Diskussion der in den Abb. 48 und 49. dargestellten Ergebnisse muß berücksichtigt werden, daß nur 2 Sextupolfamilien für die Chromatizitätskompensation eingesetzt wurden. Durch Verwendung einer weiteren Familie in dem langen geraden Stück sollte sich die dynamische Apertur, wie bei anderen Speicherringen auch, um den Faktor 2 - 3 vergrößern.

Bei einer Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation sollte es möglich sein, die optimalen Anpassungen für den Wigglerbetrieb (β_x und β_y klein) sowie für den Undulatorenbetrieb (β_x groß und β_y klein) durchzuführen. Die entsprechenden Optiken sind als Hybridoptik bekannt. In Abb. 50 ist eine solche Hybridoptik für den Speicherring ROSY II angegeben. Während die β_y -Funktion in den langen geraden Stücken Werte von 3 m/rad einnimmt, hat die β_x -Funktion für den Wigglerbetrieb Werte um 3 m/rad und für den Undulatorenbetrieb 15 - 17 m/rad. Rechnungen für die dynamische Apertur sind noch nicht durchgeführt worden. Da die Struktur der Einheitszelle nicht verändert wurde, sollten sich ähnliche Ergebnisse wie in den Abb. 47, 48 und 49 ergeben. Insbesondere muß für die Hybridoptik ein optimaler Arbeitspunkt gesucht werden.

Die Parameter des Speicherrings ROSY II sind in der Tabelle 9 zusammengestellt.

Magnetstruktur	QBA
Elektronenenergie (GeV)	3.2
Injektionsenergie (GeV)	3.0
Speicherringumfang (m)	298.800
Periodizität	12
Max. Strom (Multibunch) (mA)	300
Strahllebensdauer (h)	8
Vakuumsystem (Druck) [mbar]	$< 1 \times 10^{-9}$
Natürl. Emittanz (π nmrad)	3.4
Arbeitspunkte Q_x/Q_z	21.81 / 8.77
Natürl. Chromatizität ξ_x / ξ_y	-44.0 / -23.0
Momentum Compaction Factor	$0,65 \times 10^{-3}$
Relative Energieunschärfe (%)	0.1
$\beta_x(\max) / \beta_x(\min)$ [m/rad]	13.8 / 0.4
$\beta_z(\max) / \beta_z(\min)$ [m/rad]	16.6 / 3.24
β_x/β_z (Mitte des geraden Stückes)	7.18 / 2.64
Max. Dispersionsfunktion (m)	0.20
Dispersionsfunktion im geraden Stück (m)	0.0
Einbaulänge für Insertion Devices [m]	6
Anzahl Dipolmagnete $6^\circ / 9^\circ$	24 / 24
Ablenkradius (m)	8.00
B_{\max} auf Orbit	1.33
Gradient im Dipol (T/m)	7.108
Anzahl der Quadrupole	168
Max. Gradient (T/m) / Stärke k (m^{-2})	20 / 1.87
Anzahl Sextupole	132
g' (T/m ²) / Stärke m (m^{-3})	800 / 75
Sextupole Parameter $S = B/R^2$ (T/m ²)	400

Tabelle 9: Elektronenoptische Parameter der QBA-Struktur des Speicherringes ROSY II.

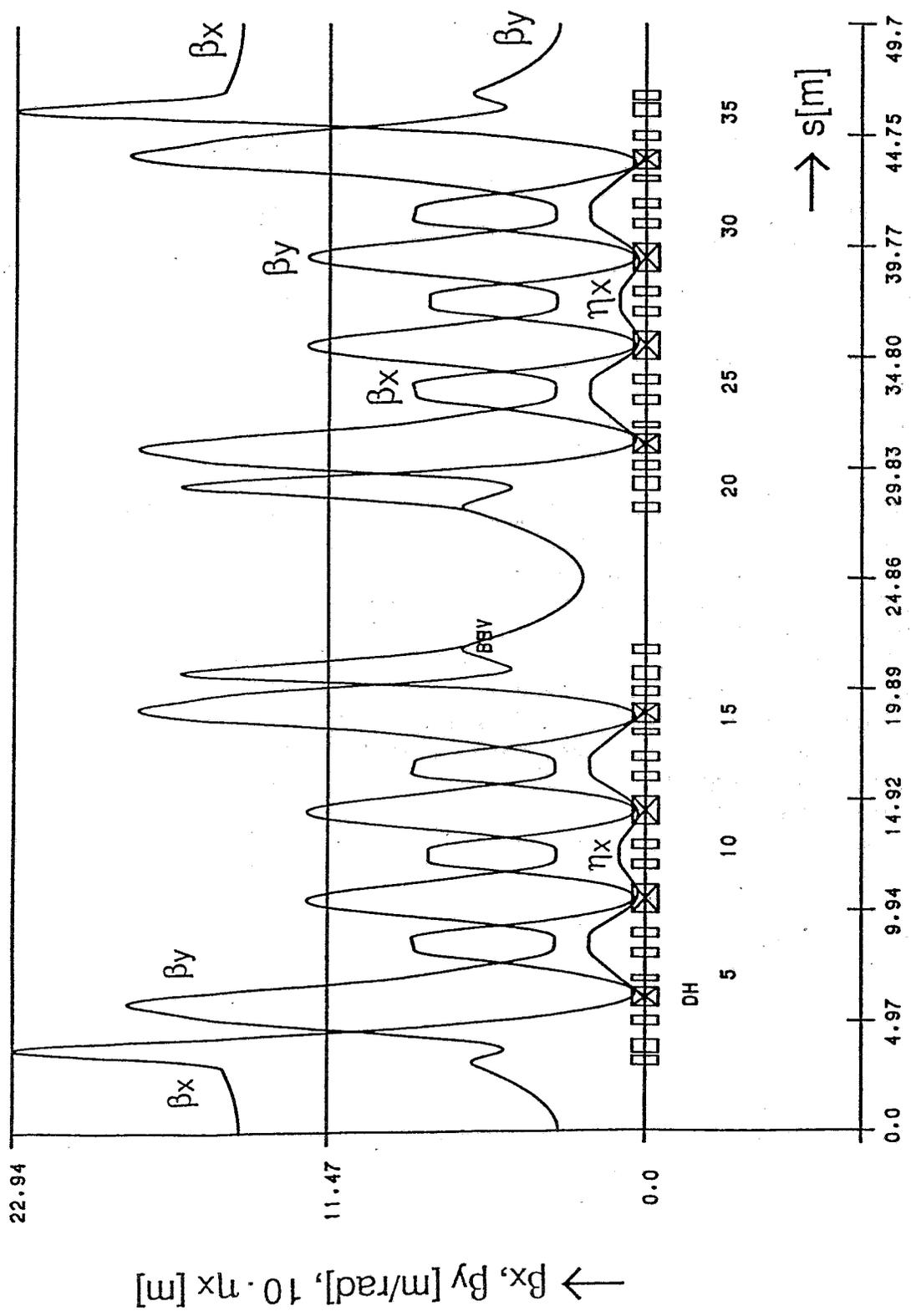


Abb. 50: Verlauf der Beta- und Dispersionsfunktion bei einer Hybridoptik für den Speicherring ROSY II

6.4 SPEICHERRINGKOMPONENTEN

Beim Bau und Entwurf der Speicherringkomponenten, wie Ablenkmagnete, Quadrupole, Sextupole, HF-Cavitiy und Vakuumsystem liegen mit den Maschinen der 3. Generation [13], [14], [15], [16], [17] zahlreiche Erfahrungen vor. Obwohl sich die Komponenten von ROSY II in einigen Punkten vom herkömmlichen Design unterscheiden, muß eine völlige Neukonzeption nicht durchgeführt werden.

6.4.1 Ablenkmagnete

Ablenkmagnete mit einem Gradienten wurden für die Synchrotronstrahlungsquelle ALS [13] und ELETTRA [14] entworfen, hergestellt und magnetisch vermessen. Bei ALS hat dieser einen Gradienten von 6.34 T/m und bei ELETTRA von 2.68 T/m. Für den Ablenkmagneten von ROSY II wird ein Gradient von 7.11 T/m; bei einem Feld $B_0 = 1.33$ T auf dem Orbit gefordert. Als Grundlage für den ROSY Ablenkmagneten wird der von ELETTRA vorgeschlagen (siehe Abb. 18).

E
ntsprechend den Ausführungen in Abschnitt 4.1 ergibt sich für den Ablenkmagneten des Speicherringes ROSY II ein Profil und ein Verlauf des Magnetfeldes, wie es in Abb. 51 und 52 wiedergegeben ist. Die

Maximalenergie (GeV)	3.2
Anzahl der Ablenkmagnete ($6^\circ/9^\circ$)	36 / 36
Ablenkradius (m)	8.0
B_{\max} auf Orbit (T)	1.33
Quadrupolstärke (m^{-2})	0,668
Gradient g(T/m)	7.108
Feldindex	42.752
Ablenkwinkel ($^\circ$)	9 / 6
Länge der Dipole (m)	1,26 / 0,84
Polschuhabstand am Orbit (mm)	60
genutzter Feldbereich x/z (mm)	$\pm 20 / \pm 12,5$
Anzahl der Windungen	48
Anzahl der Spulen	6
Stromstärke (A)	1262.5
Amperewindungen	60600
Leiterquerschnitt (mm^2)	23 x 15
Kühlbohrungsdurchmesser (mm^2)	5.5
Leistung (kW)	13 / 9
Gewicht (t)	4,7 / 3,2
Druckverlust (bar)	10 / 7
Anzahl der Kühlkreisläufe	6

Tab. 10: Zusammenstellung der Parameter der Ablenkmagnete des Speicherringes ROSY

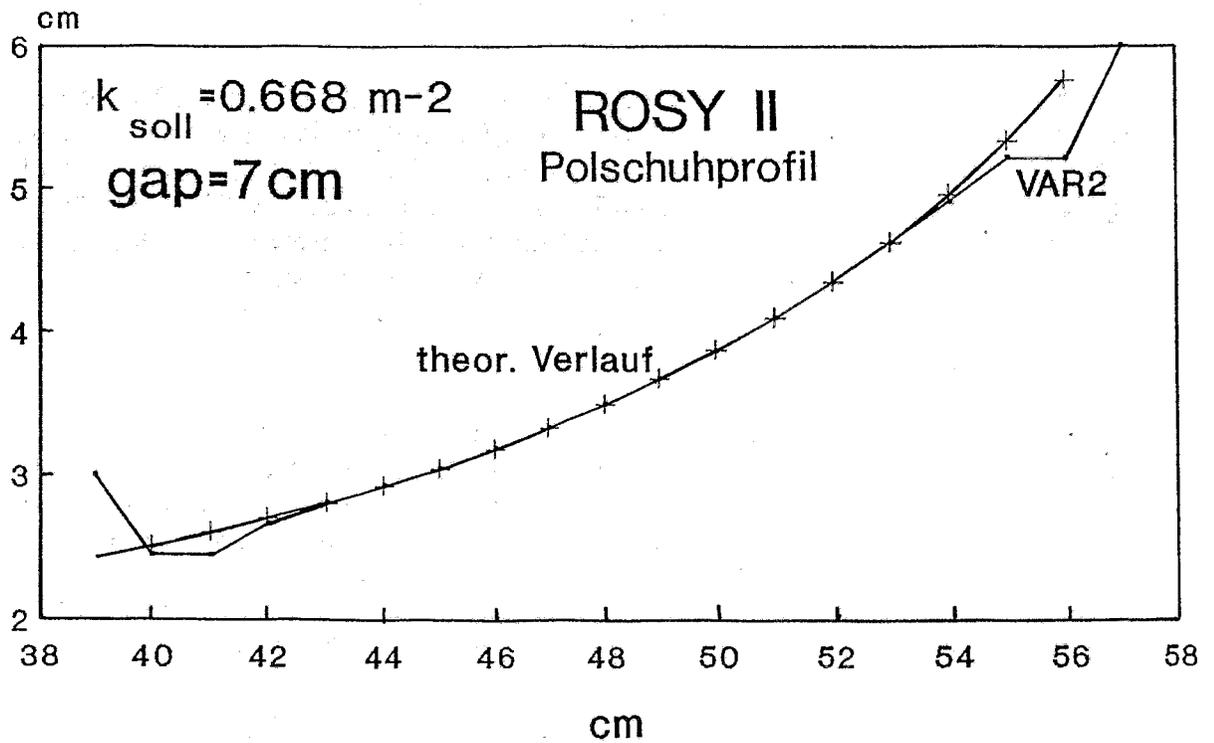


Abb. 51: Profil der Ablenkmagneten des Speicherringes ROSY II

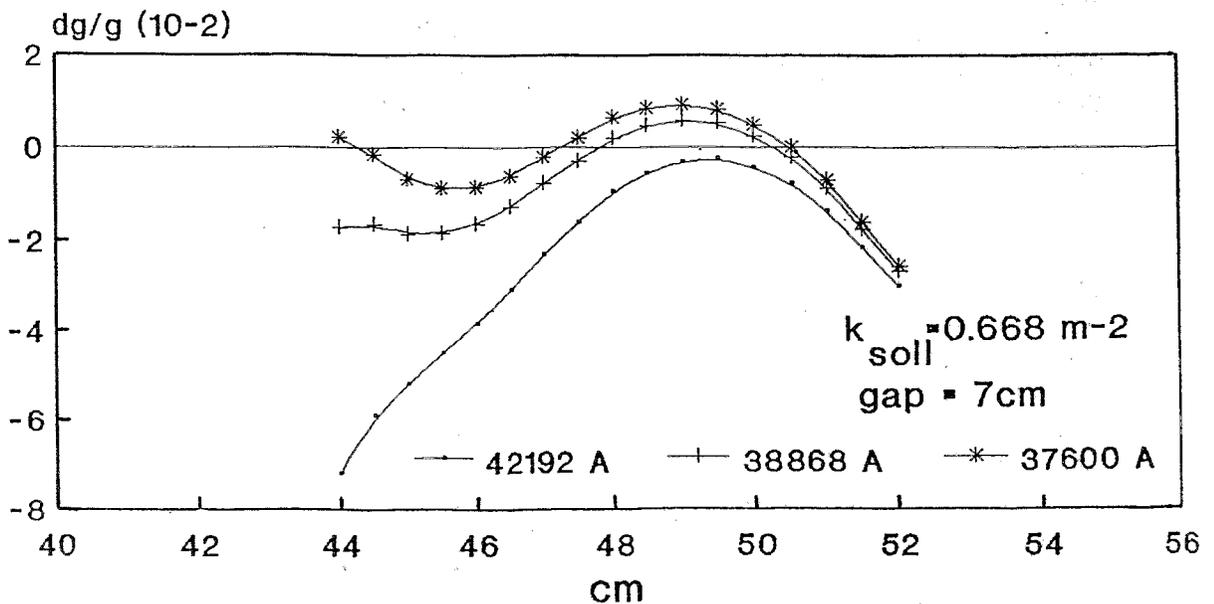


Abb. 52: Verlauf der Abweichung des Gradienten vom Soll und im Ablenkmagneten für den Speicherring ROSY II

6.4.2 Quadrupole

Die Quadrupole für den Speicherring ROSY müssen einen Gradienten von $g_{\max} = 20 \text{ T/m}$ erreichen. Ähnliche Gradienten ($g = 20 \text{ T/m}$) besitzen die Quadrupole von ELETTRA, und somit werden diese als Grundlage für ein Design der ROSY-Quadrupole vorgeschlagen, erweitert jedoch um eine Sextupolkomponente wie beim Entwurf der MAX II-Quadrupole. [16].

Für den Speicherring ROSY werden 3 Typen von Quadrupolen benötigt:

Q	Länge	Gradient	Erregung	Anzahl
Q1	0,25m	10 T/m	6365 A Wdg	24
Q2	0,40m	20 T/m	12730 A wdg	120
Q3	0,60m	20 T/m	12730 A Wdg	24

Max. Energie (GeV)	3.2
Anzahl Quadrupolfamilien	11
Anzahl der Quadrupole	168
Magnetlänge (m)	0.4
Eisenlänge (m)	0.36
Max. Gradient (T/m)	20
Aperturdurchmesser (mm)	70
Windungszahl per Pol	39
Stromstärke (A)	327
Amperewindungszahl (AWdg)	12753
Leitungsquerschnitt (mm ²)	9 x 6.8
Kühlbohrungsdurchmesser (mm)	4,6
Kühlkreisläufe	4
Leistung (kW)	7.1
Druckverlust (bar)	10
Temperaturerhöhung (°C)	10

Tab. 11: Zusammenstellung der Parameter für den Quadrupol Q2 des Speicherrings ROSY

Der Quadrupol Q1 hat im Vergleich zu Q2 eine wesentlich geringere Erregung. Das Profil aller Quadrupole soll identisch sein, und somit ergibt sich die Möglichkeit in die Quadrupole Q1 und Q2 eine Steererfunktion zu integrieren. Die Parameter des Quadrupoles Q3 sind in Tabelle 11 zusammengestellt. Das Polprofil ist in Abb. 54 wiedergegeben [16].

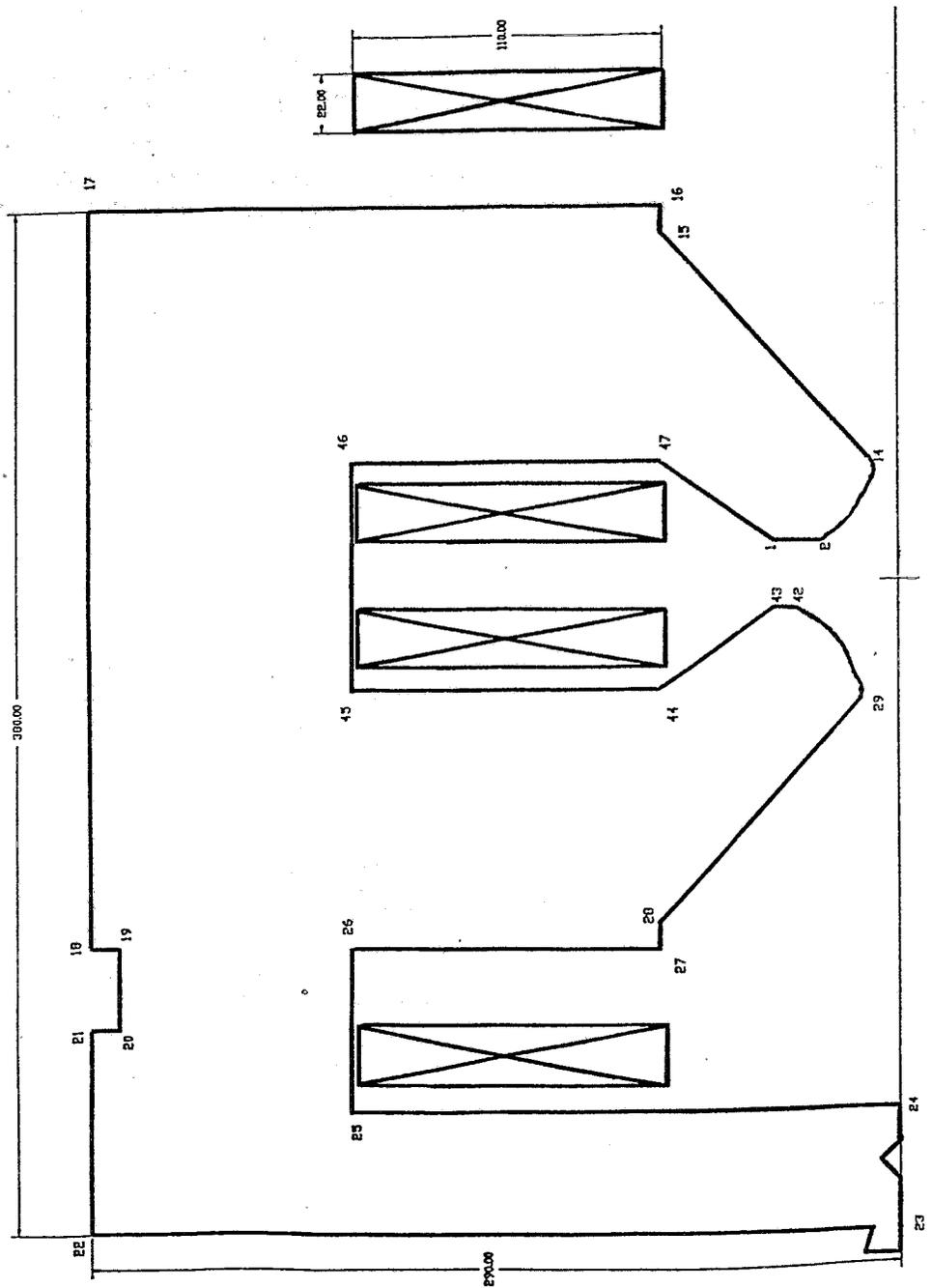


Abb. 54: Profil eines defokussierenden Quadrupoles mit einem Multipolanteil nach der Design-Studie für MAX II

6.4.3 Sextupole

Für die Chromatizitätskompensation werden Sextupole mit einer Stärke [$m = 0.2998 \cdot g' / E$] 74.95 benötigt. Bei einer Energie von $E = 3.2$ GeV folgt hieraus ein differentieller Gradient von $g' = 800$ T/m². Bei einem Aperturdurchmesser von $\phi = 70$ mm folgt hieraus ein Magnetfeld am Pol von $B_0 = 0,49$ T. Dies sind Werte, die mit dem Sextupol vom ALS [13] relativ gut übereinstimmen. Für den Sextupol des Speicherringes ROSY wird somit der vom ALS vorgeschlagen.

Das Polprofil des Sextupoles sollte jedoch zwecks einer Vergrößerung der dynamischen Apertur [18] geändert werden. Der ALS-Sextupol, mit dem auch Steererfunktionen in X- und Y-Richtung möglich sind, ist in Abb. 55 wiedergegeben; die Parameter sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Maximalenergie (GeV)	3.2
Anzahl Sextupolfamilien	2
Anzahl der Sextupole	108
Magnetlänge (m)	0,2
Eisenlänge (m)	0,18
Differentieller Gradient (T/m ²)	800
Aperturdurchmesser	70
Windungszahl per Pol	18
Stromstärke (A)	329
Amperewindungszahl	5922
Leitungsquerschnitt (mm ²)	6.8 x 9
Kühlbohrungsdurchmesser (mm)	4.6
Kühlkreisläufe	3
Leistung (kW)	2.26
Druckverlust (bar)	10
Temperaturerhöhung (°C)	10

Tab. 12: Zusammenstellung der Parameter für den Sextupol des Speicherrings ROSY

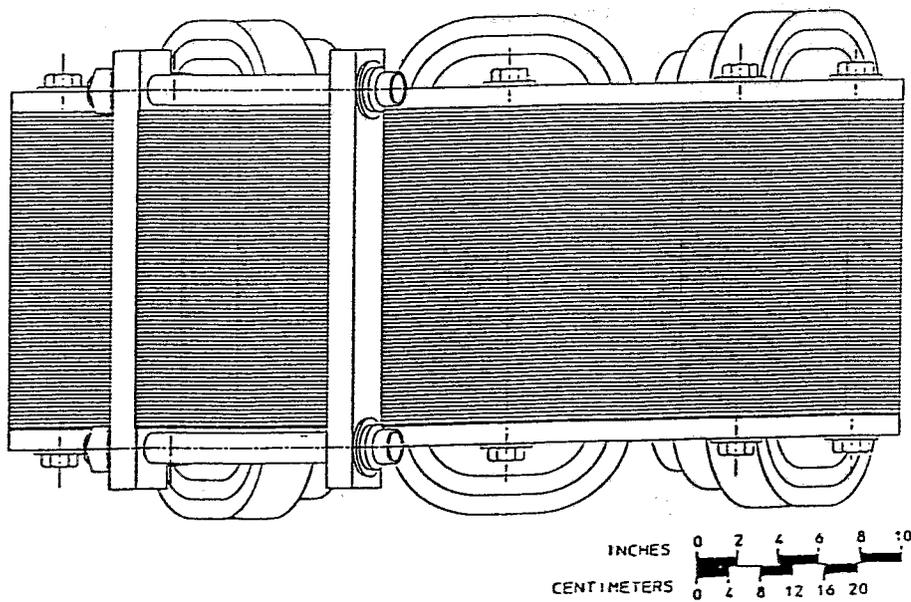
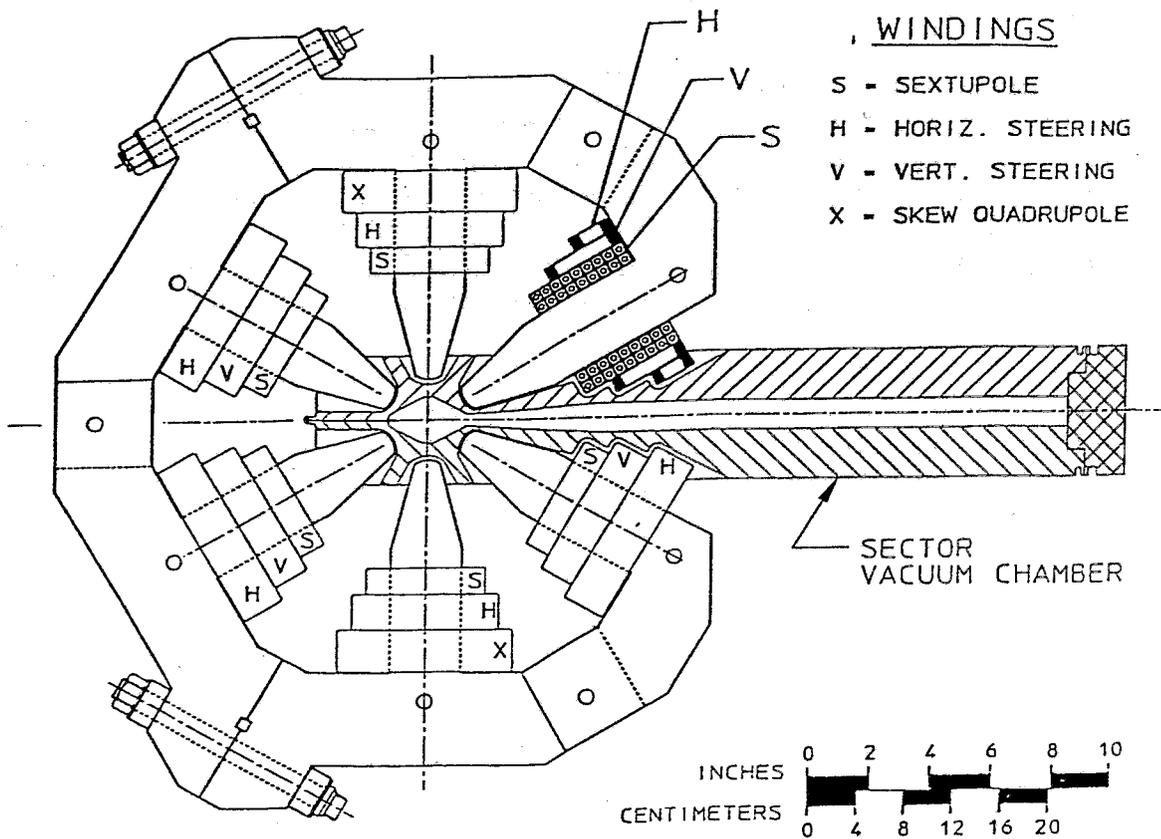


Abb. 55: Sextupol des Speicherringes ALS, der für den Speicherring ROSY vorgeschlagen wird

6.4.4 Hochfrequenzsystem für ROSY II

Für das HF-System des Booster-Speicherringes ROSY II wird ein System vorgeschlagen, das entsprechend dem des Speicherringes ROSY I aufgebaut ist. Dadurch vereinfachen sich Wartung, Service und die Ersatzteilhaltung. Weiterhin kann auf die beim Aufbau und Betrieb von ROSY I gewonnenen Erfahrungen bei der Projektrealisierung von ROSY II zurückgegriffen werden. Die Parameter des HF-Systems sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Maximalenergie (GeV)	3.2
Speicherringumfang (m)	298.8
Max. Elektronenstrom (A)	0.3
Frequenz (MHz)	500
Anzahl der Bunche	488
Momentum Compaction Factor	$0,75 \times 10^{-3}$
Dämpfungszahl D	-0.314
Dämpfungsfunktionen	
horizontal (J_x)	1.314
vertikal (J_y)	1
longitudinal (J_z)	1.686
Energieverlust pro Umlauf (keV)	1378
Ablenkmagnete	1158
Insertion Devices	217.5
Abgestrahlte Leistung (kW)	413
Ablenkmagnete	347.4
Insertion Devices	65.3
Synchrone Phase (Grad)	12.5
Overvoltage Factor	4.62
Gesamte HF-Spannung (MV)	6.353
Energieakzeptanz $\Delta E/E_0$	0.0485
Natürliche Energiebreite	1.09×10^{-3}
Bunchlänge (mm)	3.57
Anzahl der Cavities	6
Spannung pro Cavity (MV)	1.06
Verluste der Cavities (kW)	600
Gesamtleistung HF-System (MW)	1.2

Tab.13: Zusammenstellung der Parameter des HF-Systems des Speicherringes ROSY II

ROSY-CAVITY

Aus dem Vergleich der Cavityparameter ergibt sich, daß sechs ALS-Cavities für das Beschleunigungssystem von ROSY II eventuell ausreichend wären.

Beim Einsatz von sechs Cavities dieses Designs für ROSY ergibt sich für eine Einzelcavity ein HF-Input von max. 167 kW, wobei zum Aufbau des elektrischen Feldes von 1.06 MV je Cavity eine Verlustleistung von 70 kW erforderlich ist. Die gegenüber der ALS-Cavity, die für maximal 150 kW Hochfrequenzleistung dimensioniert worden ist, auftretende höhere Belastung von 17 kW ist vertretbar, ist aber bei der Konstruktion des HF-Koppelfensters sowie der Cavitykühlung unbedingt zu berücksichtigen.

Zusammenstellung der Parameter für ROSY:

- Einzelcavity des ALS-Typs

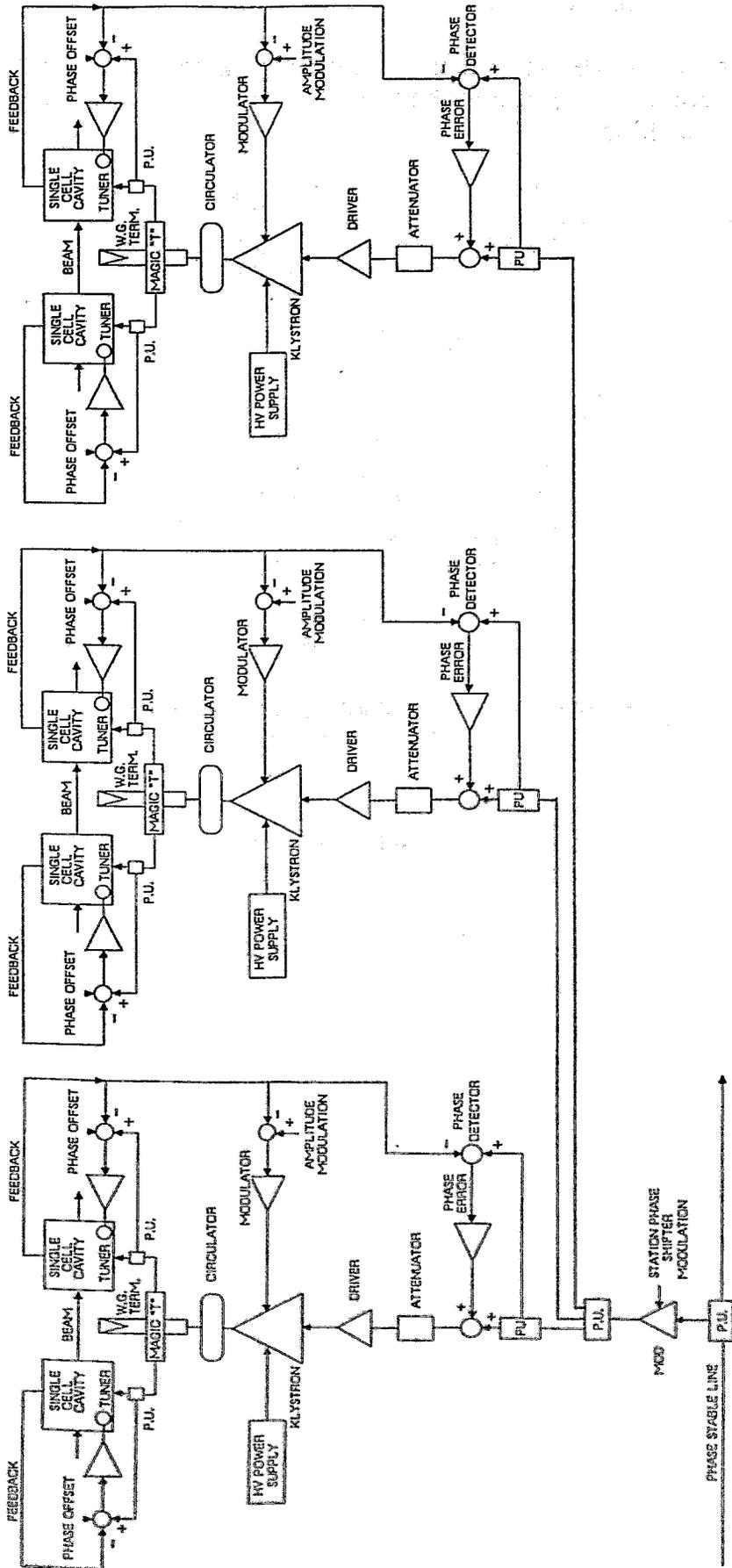
$$R_s = 8 \text{ M}\Omega, P_{\text{CAV}} = 70 \text{ kW}; P_{\text{HF}} = 167 \text{ kW}, P_B = 68.8 \text{ kW}$$

- Gesamtsystem mit 6 Cavities

$$R_s = 48 \text{ M}\Omega, P_{\text{CAV}} = 421 \text{ kW}, P_{\text{HF}} = 1 \text{ MW}, P_B = 413.4 \text{ kW}$$

Für ROSY II werden mit sechs Cavities drei Leistungsklystrons benötigt, die bei einer insgesamt zu installierenden HF-Leistung von 1 MW im linearen Bereich ihrer Kennlinie bei etwa 350 kW betrieben werden.

Vorgeschlagen wird ein modularer Aufbau nach Abb. 56. Das System besteht dabei aus drei Einzelsystemen, analog aufgebaut wie bei ROSY I. Weitere Einzelheiten sind in Abschnitt 4.5 nachzulesen.



114 - 655

Abb. 56: HF-System für den Speicherring ROSY II

7. UNDULATOREN UND WIGGLER

Undulatoren und Wiggler sind Synchrotronstrahlungsquellen mit periodisch angeordneten Magneten, wie in Abb. 57 dargestellt [28]:

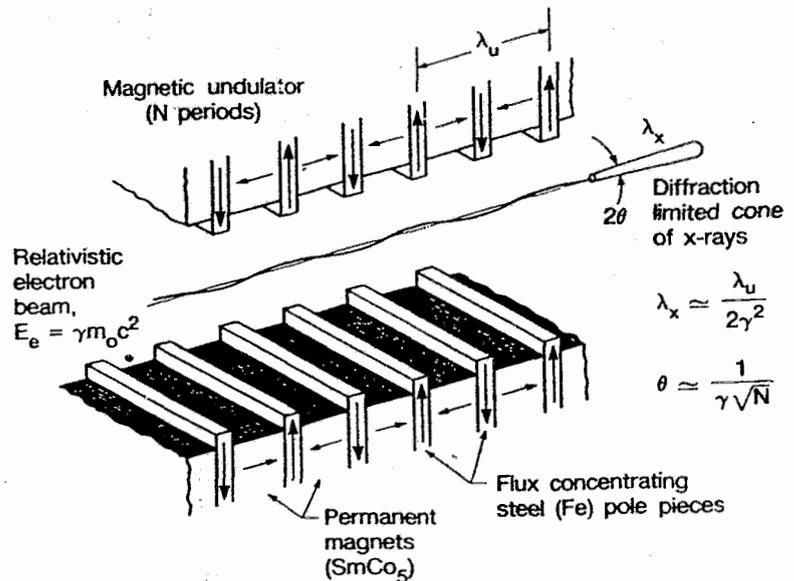


Abb. 57: Schematische Anordnung der Magnete in den Undulatoren und Wiggler.

In den Undulatoren und Wiggler kann der Verlauf der magnetischen Flußdichte näherungsweise beschrieben werden durch:

$$B_x = B_0 \cdot \sin(2\pi \cdot s/\lambda_0) \quad (26)$$

Diese Anordnung wird von den Elektronen auf einer Sinusfunktion durchlaufen:

$$X = X_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot s/\lambda_0) \quad (27)$$

Unter der Bedingung, daß an der Stelle des maximalen Feldes B_0 der Krümmungsradius dieser Bahn gleich dem Ablenkradius gegeben durch:

$$\rho = \frac{E}{e \cdot c \cdot B_0} \quad (28)$$

ist, errechnet sich die maximale Amplitude x_0 zu:

$$x_0 = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{e \cdot B}{m \cdot c} \cdot \lambda_0^2 \quad (29)$$

Die maximale Geschwindigkeit der Elektronen in X-Richtung ist:

$$V_x = 2\pi \frac{x_0}{\lambda_0} \cdot c \quad (30)$$

Der Faktor $2\pi\gamma(x_0/\lambda_0)$ wird als Ablenkungsparameter K bezeichnet. Dieser berechnet sich aufgrund der oben beschriebenen Zusammenhänge zu:

$$K = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{e \cdot B_0}{m_e \cdot c} \cdot \lambda_0 = 0.934 \cdot (B/T) \cdot (\lambda_0/\text{cm}) \quad (31)$$

Mit der Einführung des Ablenkungsparameters K ergibt sich eine maximale Auslenkung der Elektronen in den Undulatoren und Wiggler von:

$$x_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_0 \cdot K}{\gamma} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{K}{\gamma} \cdot \lambda_0 \quad (32)$$

Die maximale Geschwindigkeit in transversaler Richtung ist dann:

$$V_x = \frac{K}{\gamma} \cdot c \quad (33)$$

und die maximale Ablenkung bzw. Steigung

$$x' = \frac{K}{\gamma} \quad (34)$$

Der Öffnungswinkel der Synchrotronstrahlung θ (SR) von einem Ablenkmagneten ist $1/\gamma$. Somit ist der Ablenkungsparameter K das Verhältnis:

$$\frac{x'}{\theta(\text{SR})} = \frac{K/\gamma}{1/\gamma} = K \quad (35)$$

Für K-Werte > 3 kommt es somit zu einer einfachen Überlagerung der Synchrotronstrahlungsspektren, die bei den verschiedenen Ablenkungen innerhalb der "Insertion Devices" emittiert werden. Bei K-Werten < 3 kommt es zu einer Überlagerung und zu einer Überlappung und somit zu Interferenzerscheinungen. Insertion Devices mit $K > 3$ werden als Wiggler und mit $K < 3$ als Undulatoren bezeichnet.

Entsprechend der Art der Überlagerung ist das Synchrotronstrahlungsspektrum eines Wiggler ähnlich dem des Ablenkmagneten. Wegen der Interferenzeffekte ist das des Undulators kompliziert und nicht einfach zu berechnen. Im

folgenden soll deshalb die Strahlung des Undulators nur in Vorwärtsrichtung betrachtet werden.

In Vorwärtsrichtung besteht das Spektrum eines Undulators aus der Überlagerung der Harmonischen:

$$\lambda_i = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (i = 1, 3, 5, \dots) \quad (36)$$

In Verbindung mit Undulatoren werden verschiedene Begriffe zur Charakterisierung dieser Strahlung verwendet [26], [34] spektraler Fluß, Brightness und Brillanz. Diese Größen unterscheiden sich wie folgt:

$$\text{Spektraler Fluß: } F_i = \frac{\text{Photonen}}{s \cdot 0.1\% \text{BW}} \quad (37)$$

$$\text{Brightness: } B_g = \frac{\text{Photonen}}{s \cdot 0.1\% \text{BW} \cdot (1 \text{ mrad})^2} = \frac{F_i}{\Delta\theta\Delta\Psi} \quad (38)$$

$$\text{Brillanz: } B_l = \frac{\text{Photonen}}{s \cdot 0.1\% \text{BW} \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{mm}^2} = \frac{F_i}{\Delta\theta\Delta\Psi\Delta x\Delta y} \quad (39)$$

Die Brightness eines Undulators in Vorwärtsrichtung ist [26], [32]:

$$B_g = 4,56 \cdot 10^7 \cdot \frac{\text{Photonen}}{s \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{BW}} \cdot (N\gamma)^2 \cdot (I/A) \cdot F_i(K) \quad (40)$$

$$B_g = 1,746 \cdot 10^{14} \cdot \frac{\text{Photonen}}{s \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{BW}} \cdot N^2 \cdot (E/\text{GeV})^2 \cdot (I/A) \cdot F_i(K) \quad (41)$$

$$F_i(K) = \frac{i^2 K^2}{\left(1 + \frac{1}{2} K^2\right)^2} \left[J_{\frac{i-1}{2}}(\xi) - J_{\frac{i+1}{2}}(\xi) \right] \quad (42)$$

$$\xi = \frac{iK^2}{4\left(1 + \frac{1}{2} K^2\right)}, \quad J = \text{Besselfunktion} \quad (43)$$

Das Spektrum eines Undulators hat im Idealfall den Öffnungswinkel:

$$\sigma_r = \theta_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{L}} = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{2} K^2}{2i \cdot N}} \quad (44)$$

Durch Multiplikationen der Brightness mit dem räumlichen Winkel $2\pi\sigma_r$ ergibt sich der spektrale Fluß eines Undulators zu:

$$FI = 2.87 \cdot 10^{14} \cdot \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot 0.1\% \text{BW}} \cdot N \cdot (I/A) \cdot \frac{1 + \frac{1}{2}K^2}{2 \cdot i} \cdot F_i(K) \quad (45)$$

$$FI = 1.435 \cdot 10^{14} \cdot \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot 0.1\% \text{BW}} \cdot N \cdot (I/A) \cdot Q_i(K) \quad (46)$$

Hieraus folgt, daß im Gegensatz zur Brightness der spektrale Photonenfluß nicht von der Energie des Elektronenstrahles abhängt. D. h. bei gleichem Aufbau und somit gleicher geometrischer Anordnung der Magnete im Undulator, liefert dieser immer den selben spektralen Photonenfluß. Undulatoren, betrieben mit Elektronen verschiedener Energie liefern immer den selben Fluß mit der Maßgabe, daß die zentrale Strahlungskeule immer enger wird ($\Delta\psi \approx 1/\gamma^2$) und die Wellenlängen λ_i verschoben ($\approx 1/\gamma^2$) werden. Die Funktionen $F_i(K)$ und $Q_i(K)$ sind in Abb. 58 und 59 wiedergegeben.

Die Brillanz eines Undulators in Vorwärtsrichtung berechnet sich zu:

$$BI = \frac{FI}{4\pi^2 \cdot \Sigma_x \Sigma_y \Sigma_{x'} \Sigma_{y'}} = \frac{Br}{2\pi^2 \Sigma_x \Sigma_y} \quad (47)$$

Oft wird auch an Stelle von $4\pi^2$ der Faktor $(2\pi)^{3/2}$ genommen. In der Formel für die Brillanz gilt:

$$\begin{aligned} \Sigma_x &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_r^2} = \sqrt{\epsilon_x \beta_x + \left(\frac{1}{4\pi}\right)^2 \lambda \cdot L} \\ \Sigma_y &= \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_r^2} = \sqrt{\epsilon_y \beta_y + \left(\frac{1}{4\pi}\right)^2 \lambda \cdot L} \\ \Sigma_{x'} &= \sqrt{\sigma_{x'}^2 + \sigma_r^2} = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\beta_x} + \frac{\lambda}{L}}, \quad \Sigma_{y'} = \sqrt{\sigma_{y'}^2 + \sigma_r^2} = \sqrt{\frac{\epsilon_y}{\beta_y} + \frac{\lambda}{L}} \end{aligned} \quad (48)$$

Hierbei bedeuten:

$\epsilon_{x,y}$ = Elektronenemittanz

$\beta_{x,y}$ = Betafunktion

σ_r = Querschnitt des Undulatorstrahles

$\sigma_{r'}$ = Divergenz des Undulatorstrahles

Sind die Größen des "Undulatorstrahles" gegenüber denjenigen des Elektronenstrahles zu vernachlässigen, so berechnet sich die Brillanz zu:

$$\begin{aligned} BI &= \frac{FI}{4\pi^2 \sqrt{\epsilon_x \beta_x} \cdot \sqrt{\epsilon_y \beta_y} \cdot \sqrt{\epsilon_x/\beta_x} \cdot \sqrt{\epsilon_y/\beta_y}} \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \frac{FI}{\epsilon_x \cdot \epsilon_y} = \frac{FI}{4\pi^2 \cdot \text{Kopplung} \cdot \epsilon_x^2} \end{aligned} \quad (49)$$

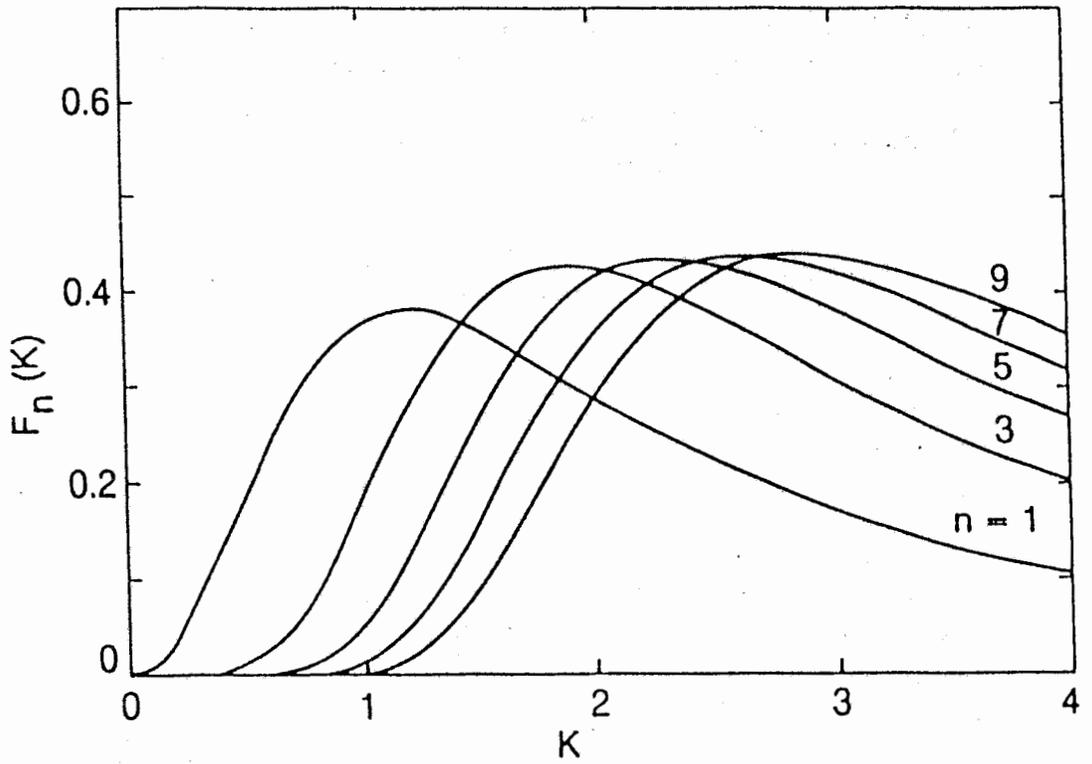


Abb. 58: Funktion $F_i(K)$ zur Berechnung der Brightness von Undulatoren für die Harmonischen $i = 1, 3, 5$ und 7

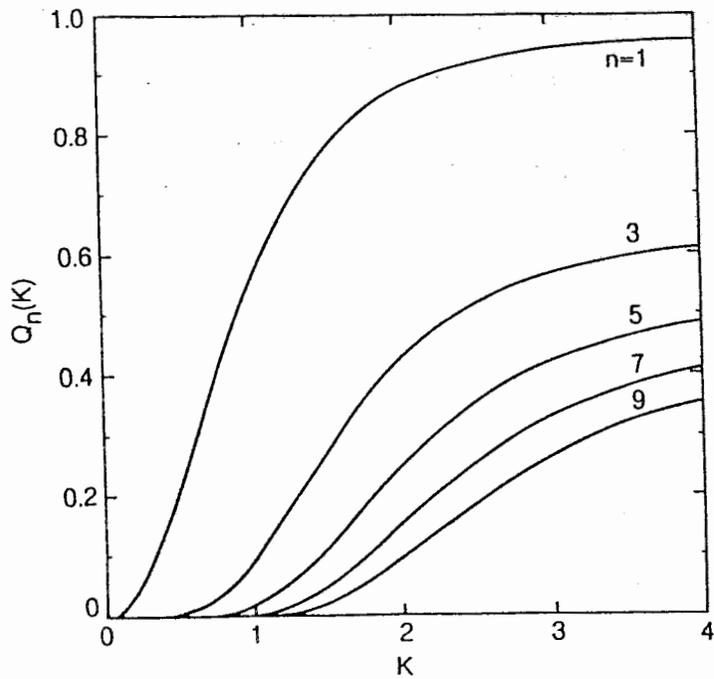


Abb. 59: Funktion $Q_i(K)$ zur Berechnung des Photonenflusses von Undulatoren für die Harmonischen $i = 1, 3, 5$ und 7

Die Verkleinerung der Emittanz um den Faktor 10 hat also eine Vergrößerung der Brillanz um den Faktor 100 zur Folge.

7.1 Undulatoren und Wiggler für ROSY II

In einem ersten Konzept werden für ROSY II Undulatoren U 4.0, U 5.0, U 7.0 und U 8.0 sowie ein Wiggler W 12.5 vorgeschlagen. Die Daten dieser "Insertion Devices" - wie Periodenlänge, Anzahl der Perioden, magn. Flußdichte u.s.w. - sind in der Tabelle 14 zusammengestellt. Der von diesen Undulatoren und Wiggler emittierte spektrale Photonenfluß sowie die mit dem Speicherring ROSY II erreichte Brillanz sind in den Abb. 60 und 61 wiedergegeben.

Für die Berechnung der Kurven in den Abb. 60 und 61 wurden folgende Daten zugrunde gelegt:

3 GeV; 100 mA; $\epsilon_x = 3 \times 10^{-9}$; $\epsilon_y = 3 \times 10^{-10}$; $\beta_x = 8.4$;
 $\beta_y = 2.2$; gap = 20 mm; $L_{ID} = 5$ m

Undulatoren

λ_0/cm	N	$B_0(\text{T})$	K	P_{tot}/W	$P_{\text{den}}(\text{W}/\text{mrad}^2)$
U 4,0	125	0,39	1,47	441	4189
U 5,0	100	0,54	2,52	827	4675
U 7,0	71	0,77	5,05	1686	4798
U 8,0	62	0,86	6,45	2106	4693

Für die verschiedenen Undulatoren ergibt sich folgender spektraler Arbeitsbereich (eV) bei Veränderung des Abstandes im Gap:

λ_0/cm	i = 1	i = 3	i = 5
U 4,0	1027 - 2080	3080 - 5010	5133 - 6600
U 5,0	401 - 1660	1230 - 3800	2051 - 5200
U 7,0	88.9 - 1150	267 - 2600	445 - 3300
U 8,0	49.0 - 1000	147 - 2200	245 - 2800

Wiggler W 12.5

$\lambda_0 = 125 \text{ mm}$; $B_0 = 1,5 \text{ T}$; $N = 31$; ($N_{\text{pole}} = 61$);
 $K = 17.5$;

Öffnungswinkel für die Strahlung $\pm 3 \text{ mrad}$;
 $P_{\text{tot}} = 4,9 \text{ kW}$; $P_{\text{den}} = 4.1 \text{ kW}/\text{mrad}^2$

Tab. 14: Daten der für den Speicherring ROSY II vorgeschlagenen Wiggler und Undulatoren

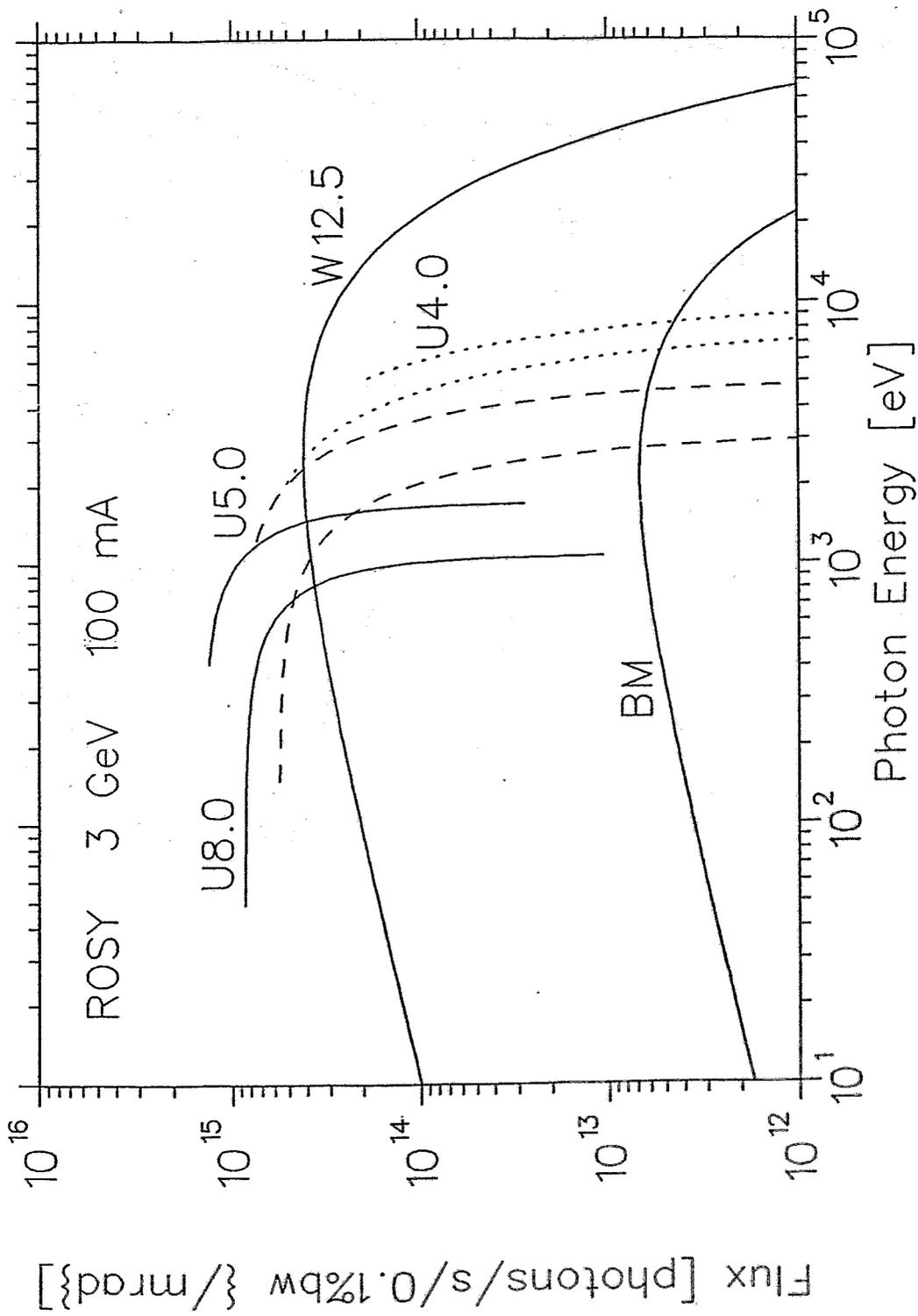


Abb. 60: Photonenfluß von Ablenk magneten (BM), Wiggler (W12.5) und den Undulatoren U4, U5 und U7

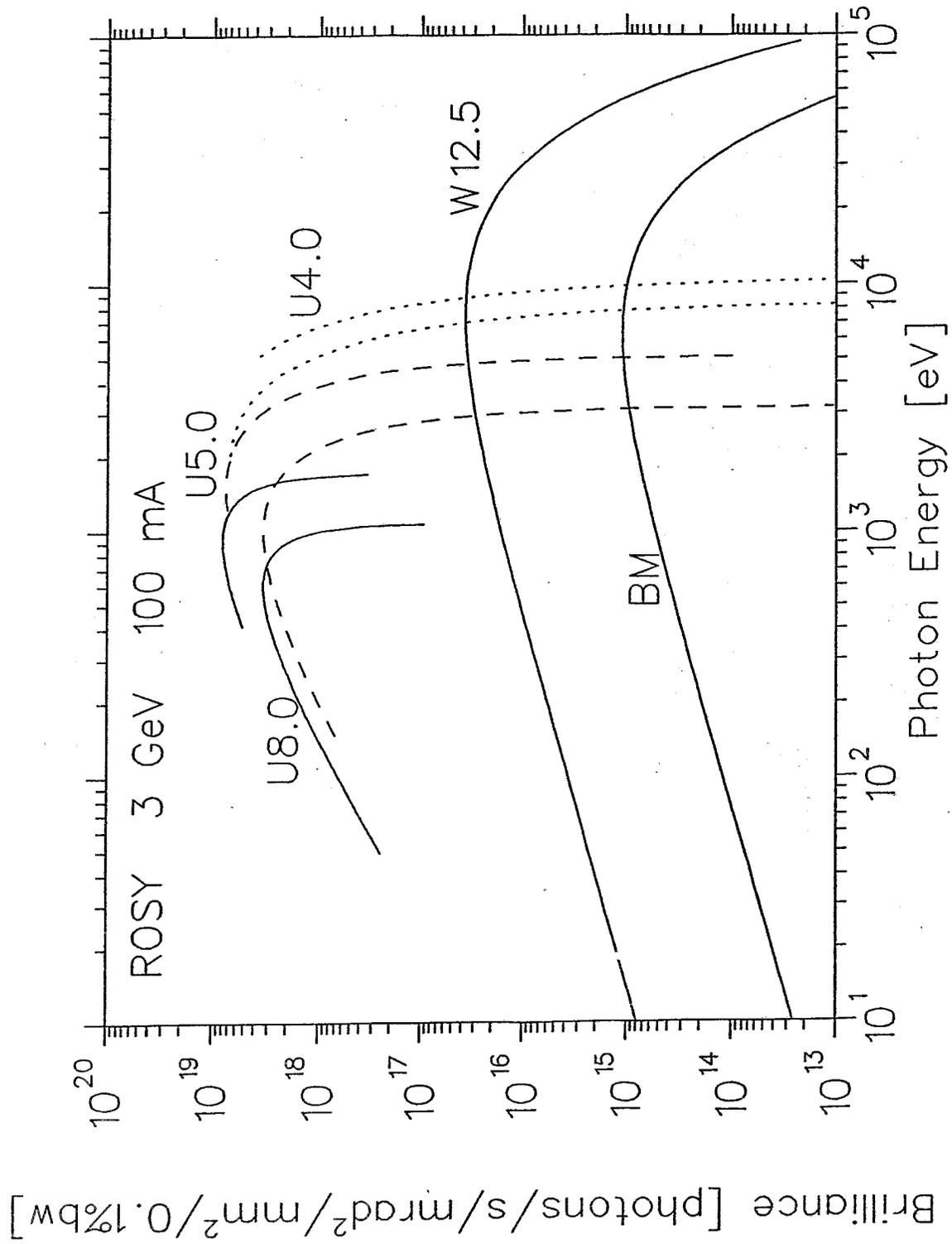


Abb. 61: Brillanz der Synchrotronstrahlung am Ablenkmagneten (BM),
Wiggler (W 12.9) und den Undulatoren

6.2 Undulatoren und Wiggler für ROSY I

Eine detaillierte Anordnung der Magnete in den Undulatoren und Wigglern (Abb. 57) zeigt Abb. 62. Wiedergegeben sind in dieser Abbildung auch die Formeln nach denen sich das Magnetfeld B_0 als Funktion der Gaphöhe g , der Periodenlänge λ_0 und des Materials (a , b und c) berechnet [14].

Entsprechend dem Aufbau werden zwei Typen von Undulatoren/Wiggler unterschieden: der reine Permanentmagnet (PPM) und der Hybridmagnet (HYB). Die Magnete selbst werden aus dem seltenen Erden Material Kobalt (REC) bzw. dem Gemisch Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) aufgebaut. Die Abhängigkeit der magnetischen Flußdichte B_0 und des Ablenkungsparameter K für die beiden Periodenlängen $\lambda_0 = 35$ mm und 50 mm sind in Abb. 63 dargestellt.

Mit den Parametern K und λ_0 ist nach Gl. (36), die emittierte Wellenlänge und nach Gl. (45/46) der Photonenfluß berechenbar. Die Ergebnisse sind in Abb. 64 zusammengestellt. Der größte Photonenfluß und die kleinste Photonenenergie entspricht in Abb. 63 der kleinsten Gaphöhe (15 mm); der kleinste Photonenfluß entspricht der größten Gaphöhe (50 mm). Mit diesen beiden Typen von Undulatoren ($\lambda_0 = 35$ und 50 mm) werden Photonenflüsse von 10^{15} Photonen pro Sekunde und 0.1 % Bandbreite erreicht. Diese Werte entsprechen denen anderer Synchrotronstrahlungsquellen, nur sind die Spektren wegen der γ^2 -Abhängigkeit verschoben.

Nach Abb. 64 ist die Energie der Undulatorphotonen maximal 6 - 8 keV und das Maximum der Photonenflüsse liegt bei $E = 0.4 - 3$ keV. Für die Untersuchungen in der Materialforschung, die einen Energiebereich von 6 - 10 keV fordern, sind somit Undulatoren bei ROSY I nicht besonders geeignet. Zusätzlich muß beachtet werden, daß bei den Undulatoren die Durchstimmung eines Spektrums nur durch eine Gaphöhenänderung möglich ist. Dies ist ein Prozeß, der für physikalische Experimente einen relativ langen Zeitraum in Anspruch nimmt und für spektroskopische Untersuchungen nachteilig ist.

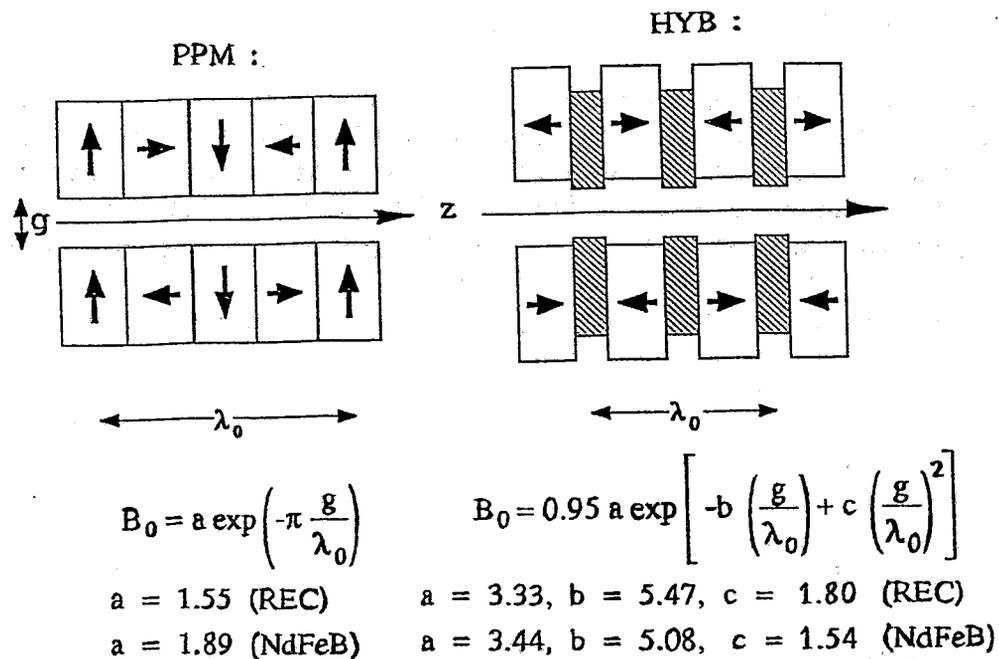


Abb. 62: Anordnung von Magneten in Undulatoren und Wiggler

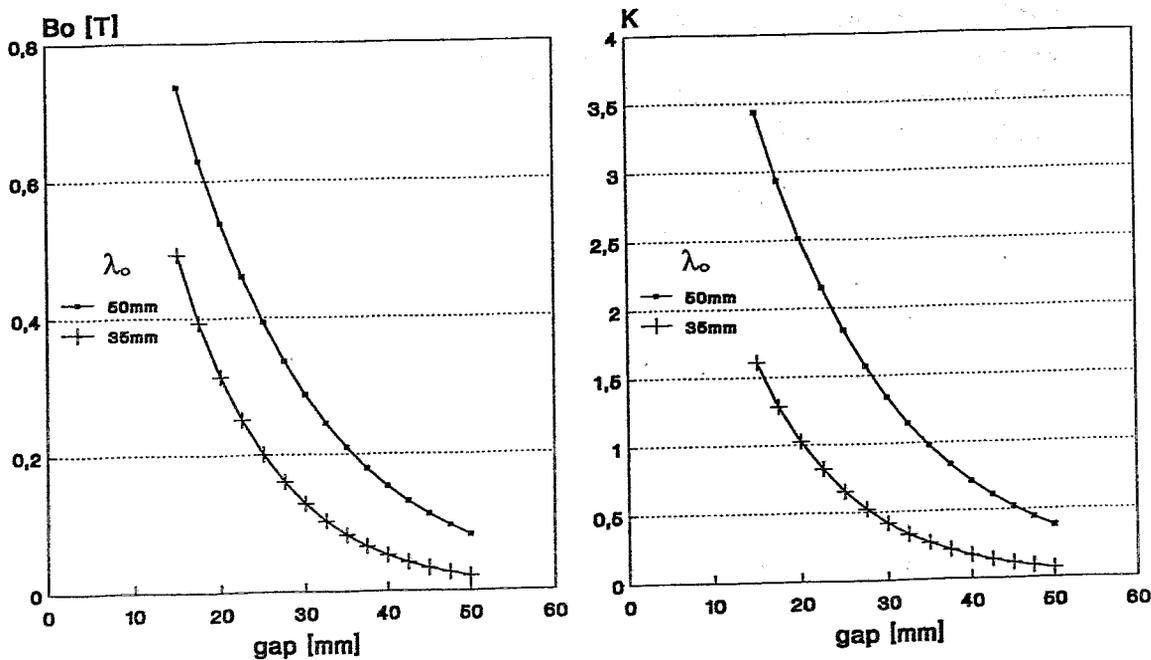


Abb. 63: Abhängigkeit des Magnetfeldes und der Ablenkungsparameter von der Gaphöhe

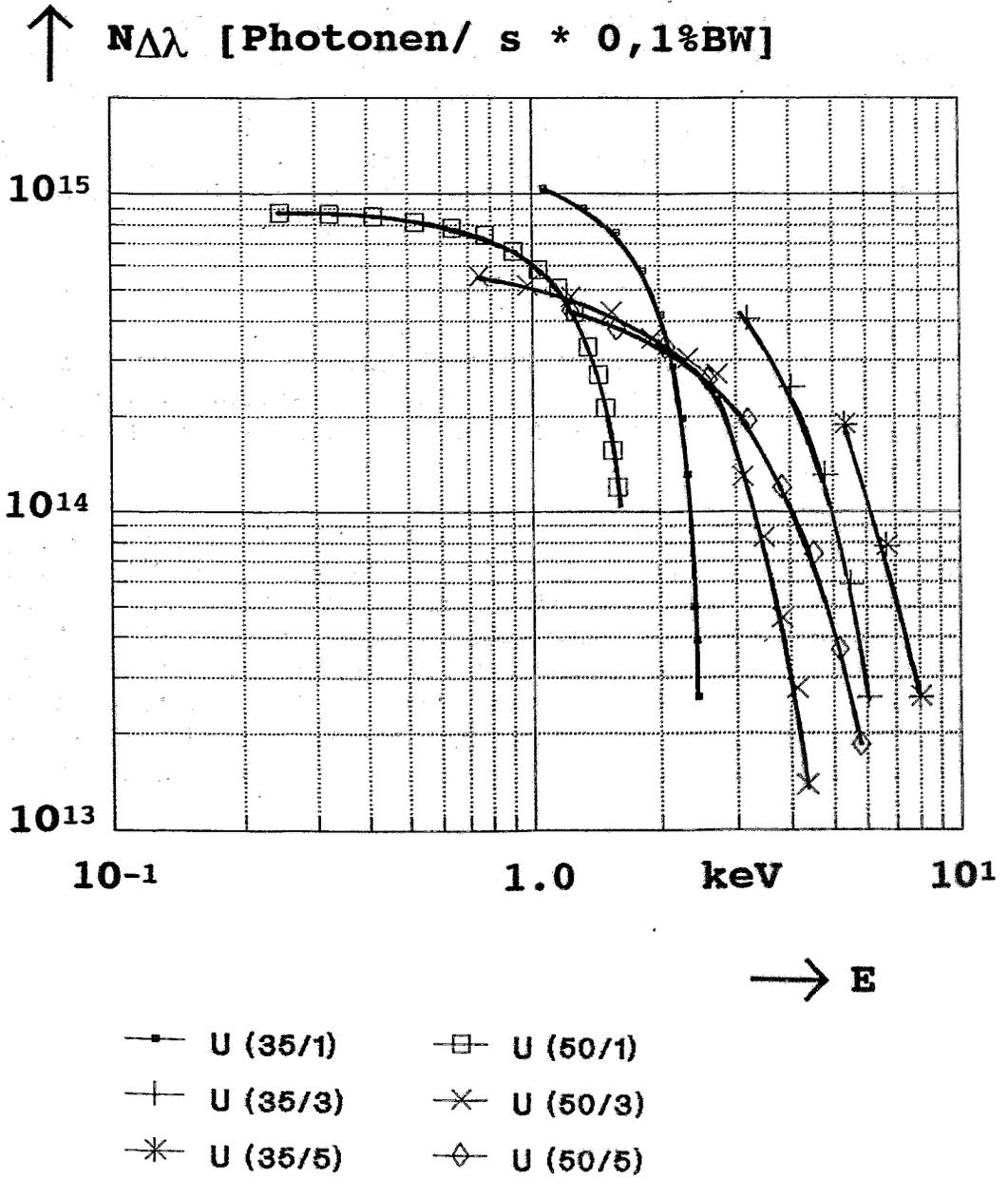


Abb. 64: Photonenflüsse von Undulatoren am Speicherring ROSY I

Anders ist es bei den Wigglern, hier wird, wie im Ablenkmagneten auch, ein kontinuierliches Spektrum emittiert. Bei einer Periodenlänge von $\lambda_0 = 125$ mm und einer magnetischen Flußdichte von $B_0 = 1.5$ T (entsprechend dem Wiggler für ROSY II) ergibt sich ein K-Wert von 17.5. Bei diesem Wiggler ist der nutzbare Bereich in der horizontalen Richtung $\theta = 6$ mrad. Nach Abb. (10/13) steht für den Wiggler in den langen geraden Strecken eine Einbaulänge von 4m zur Verfügung. Bei einer Länge des Wigglers von 3m ergeben sich insgesamt 24 Perioden und 48 Magnete, die zum Photonenfluß des Wigglers beitragen. Die mit diesen Parametern berechneten Photonenflüsse des Wigglers 1 sind in Abb. 65 dargestellt. Im Verhältnis zum Ablenkmagneten ergibt sich ein um den Faktor 20 größerer Photonenfluß.

Wird die minimale Intensität mit $2 \cdot 10^{13}$ Photonen pro Sekunde und 0.1 % Bandbreite angegeben, so überdeckt der Wiggler 1 einen Spektralbereich bis zu Photonenenergien von $E_c = 50$ keV. Der nutzbare Spektralbereich wird mit dem Wiggler 1 gegenüber den Ablenkmagneten um den Faktor 2 - 3 vergrößert.

Aufgrund der Magnetstruktur von ROSY I ist es möglich, im Bereich der Anpassungszellen Mini-Wiggler mit einer Länge zwischen 1 m und 1,2m einzubauen. Der Photonenfluß, der mit diesen Mini-Wigglern erzeugt wird, ist in Abb. 65 mit Wiggler (2) wiedergegeben. Schon mit diesem Mini-Wiggler ergibt sich ein Photonenfluß, der um den Faktor 6 größer ist als am Ablenkmagneten. Der nutzbare Spektralbereich wird im Verhältnis zum Ablenkmagneten um den Faktor 2 vergrößert.

Aus diesen Betrachtungen kann allgemein geschlossen werden, daß in eine Synchrotronstrahlungsquelle, die hauptsächlich in der Materialforschung genutzt wird, möglichst viele Einbauplätze für Wiggler eingebaut werden sollte. Bei ROSY I stehen 2 Plätze für längere Wiggler und 6 Einbauplätze für Mini-Wiggler zur Verfügung.

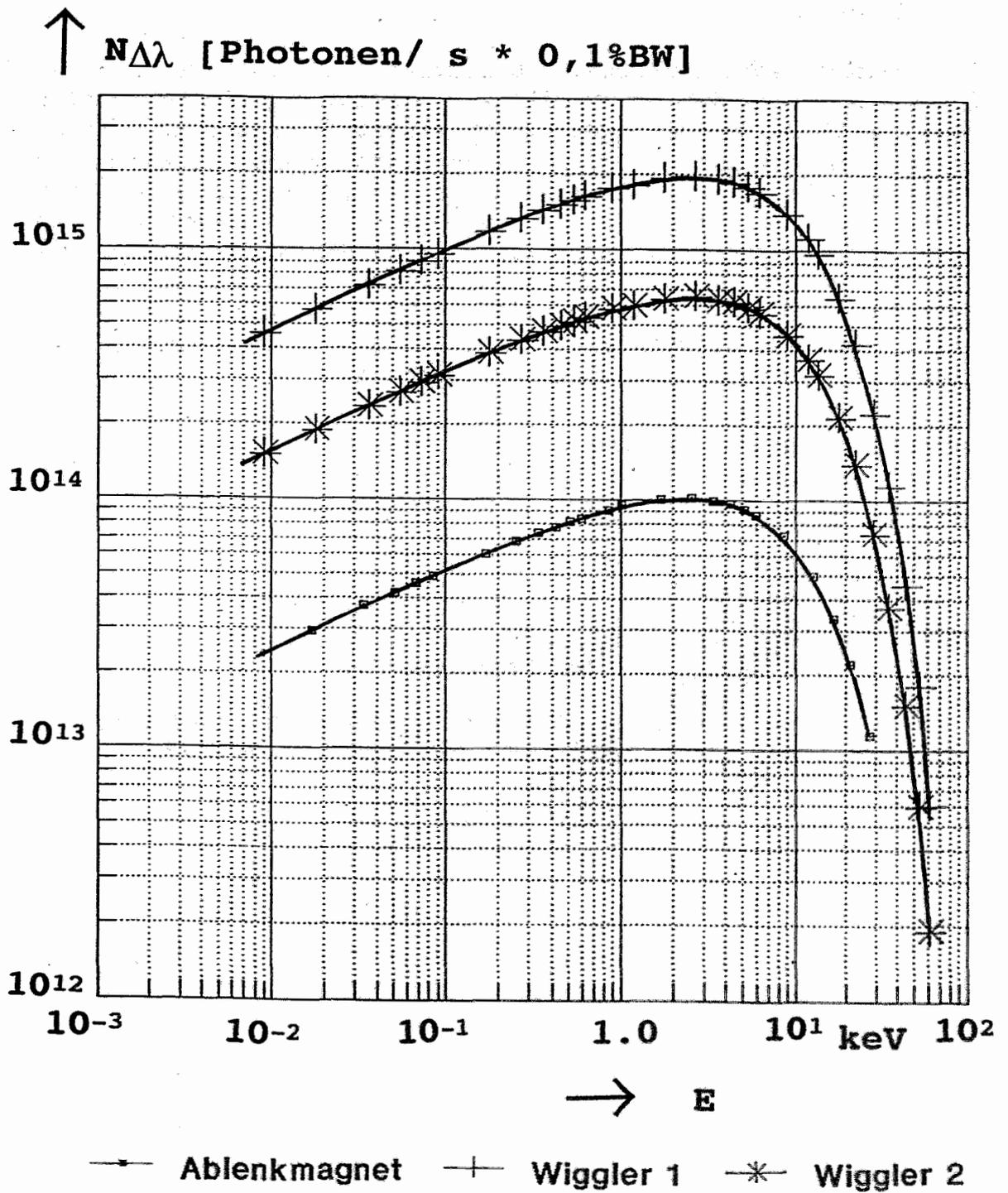


Abb. 65: Photonenflüsse von Wigglern am Speicherring ROSY I

8. Synchrotronstrahlungscharakteristiken

8.1 Eigenschaften der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY I

Die grundlegenden theoretischen Arbeiten zur Synchrotronstrahlung wurden von Schwinger [29] sowie Sokolov und Ternov [30] durchgeführt. Nach dieser Theorie emittiert ein Elektron, welches auf dem Radius ρ mit relativistischen Geschwindigkeiten umläuft, die in Abb. 66 dargestellte Strahlungscharakteristik [30]. Die Strahlung wird in tangentialer Richtung innerhalb eines kleinen Öffnungswinkels emittiert. Diese Strahlungscharakteristik hat, wie aus Abb. 66 zu entnehmen, in horizontaler und vertikaler Richtung unterschiedliche Verteilungen. In horizontaler Richtung ergeben sich im Winkel α von der tangentialen Richtung charakteristische Einsattelungen.

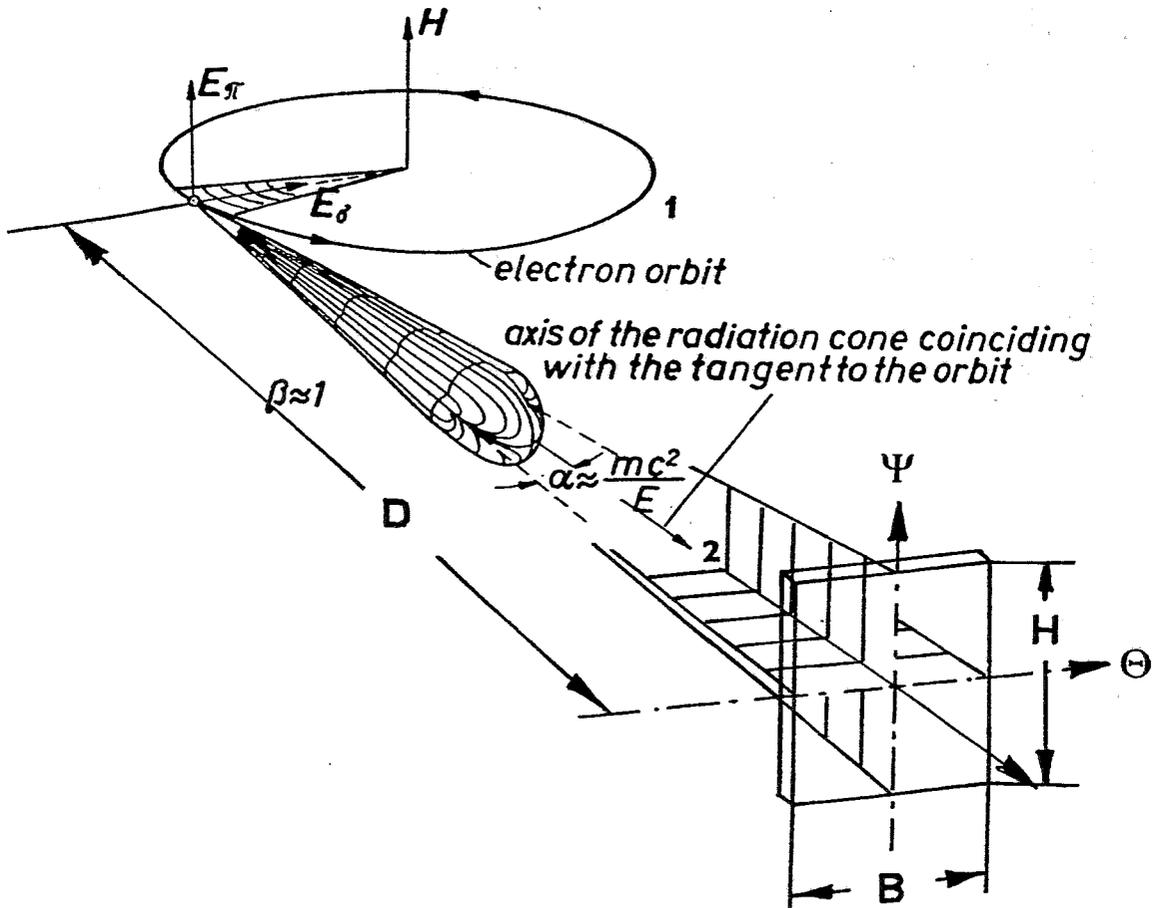


Abb. 66: Momentane Strahlungscharakteristik eines Elektrons, das mit relativistischen Geschwindigkeiten auf einer Kreisbahn umläuft.

Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, daß der Öffnungswinkel für die Synchrotronstrahlung in vertikaler Richtung ebenfalls in der Größenordnung von α liegt. Der Winkel $\alpha = 1/\gamma$ ist dabei durch das Verhältnis von Ruheenergie des Elektrons zur Gesamtenergie bestimmt. Bei einer 3 GeV-Synchrotronstrahlungsquelle bedeutet dies einen Öffnungswinkel von 0.17 mrad.

Diese Strahlungscharakteristik ist, entsprechend der Theorie, eine Funktion der Wellenlänge λ , der Energie E des umlaufenden Elektrons und des Radius ρ , auf dem das Elektron umläuft. Mit der Zusammenfassung der Maschinenparameter in der kritischen Wellenlänge $\lambda_c = 4 \pi \rho / 3 \gamma^3$ ist das Synchrotronstrahlungsspektrum eine Funktion der Größen $y = \lambda_c / \lambda$ und $x = \gamma \cdot \psi$, wobei ψ der azimutale Winkel ist.

Auf die Einzelheiten der Synchrotronstrahlungstheorie soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, denn nur die Ergebnisse dieser Theorie, angewandt an ROSY I, sind hier von Interesse. Eine Zusammenstellung findet sich bei Green [31] und Kim [35]. Die Arbeit von Green diente auch als Grundlage für die hier wiedergegebenen Ergebnisse.

Die spektrale Strahlstärke I_λ der Synchrotronstrahlung ist:

$$I_\lambda = \frac{d^3 p}{d\lambda d\theta d\psi} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{3}{4\pi}\right)^3 \cdot \frac{e \cdot I}{\epsilon_0} \cdot \frac{1}{\rho^2} \cdot \gamma^8 \cdot y^4 \cdot F\left(\frac{1}{2} \frac{\lambda_c}{\lambda}, \gamma \psi\right) \quad (50)$$

$$F\left(\frac{1}{2} \frac{\lambda_c}{\lambda}, \gamma \psi\right) = F^*(yx) = (1+x^2)^2 \left\{ K_{2/3}^2(\xi) + \frac{x^2}{1+x^2} K_{1/3}^2(\xi) \right\}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot y \cdot (1+x^2)^{3/2} \quad \text{mit } x = \gamma \cdot \psi \text{ und } y = \lambda_c / \lambda$$

Als Zahlenwertgleichung ergibt sich hieraus (siehe [31, 32]):

$$I_\lambda = 3.918 \cdot 10^{-20} \cdot \frac{W}{\text{nm} \cdot \text{rad} \theta \cdot \text{rad} \psi} \cdot \frac{(I/A)}{(\rho/m)^2} \cdot \gamma^8 \cdot y^4 \cdot F^*(yx) \quad (51)$$

Die Abhängigkeit der azimutalen Verteilung der spektralen Strahlstärke von den Maschinenparametern und der Wellenlänge ist im wesentlichen durch die modifizierten Besselfunktionen II. Art $K_{2/3}(\xi)$ und $K_{1/3}(\xi)$ gegeben. Das Argument dieser Besselfunktionen ist bestimmt durch die Wellenlänge λ und den Bahnradius ρ , die Energie E und das Produkt aus γ und dem Azimutwinkel ψ . Die Ab-

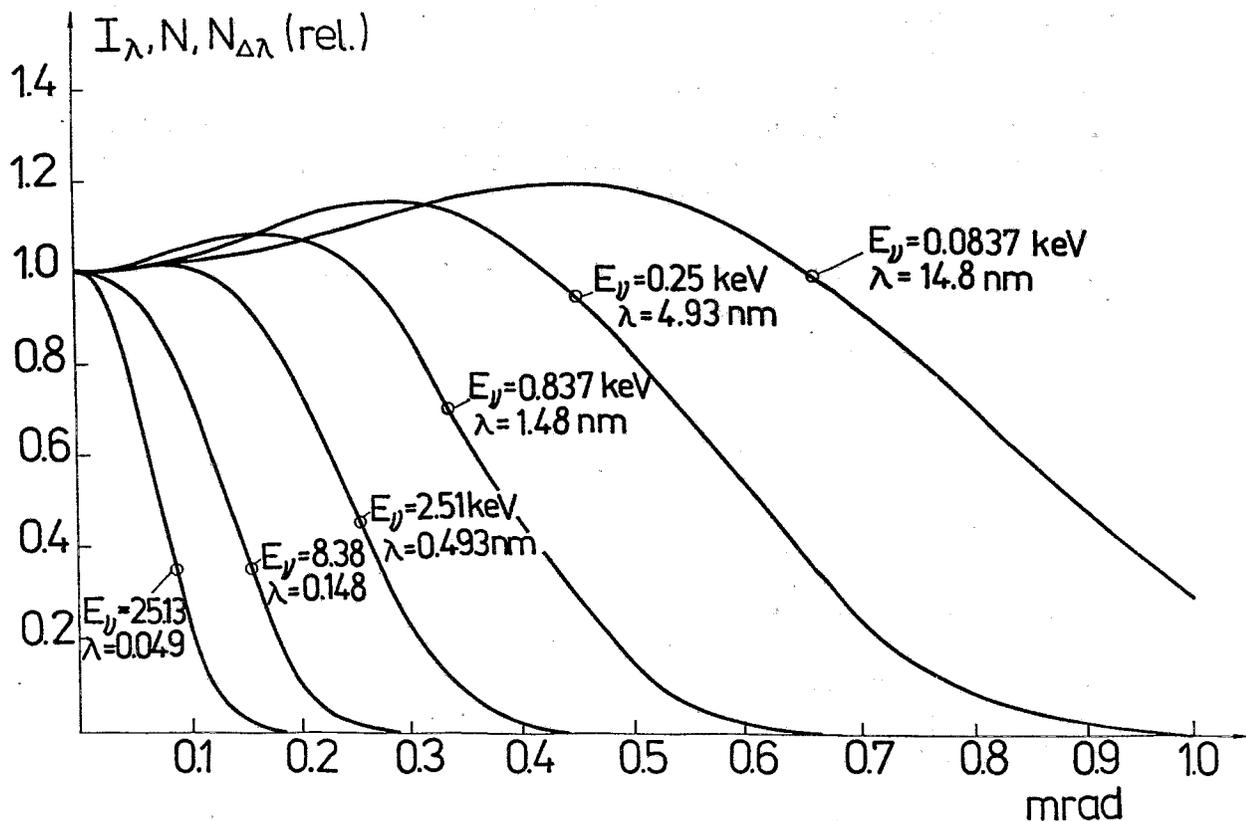


Abb. 67: Relative azimuthale Verteilung der Synchrotronstrahlung (spektrale Strahlstärke I_λ) von ROSY I

hängigkeit von den Maschinenparametern ρ und E wird durch die kritische Wellenlänge λ_c ausgedrückt. Der Anteil der von den beschleunigten Elektronen emittierten spektralen Strahlungsstärke ($I_{\lambda, \parallel}$), bei dem der elektrische Feldvektor parallel zur Synchrotronebene schwingt, ist proportional ($K^2_{2/3}(\xi)$), während der Anteil, bei dem der elektrische Feldvektor senkrecht zur Synchrotronebene schwingt ($I_{\lambda, \perp}$), proportional zu ($K^2_{1/3}(\xi)$) ist.

Der relative Verlauf der azimuthalen Verteilung der Synchrotronstrahlung von ROSY I ist in Abb. 67 wiedergegeben. An diesen beiden Funktionen lassen sich die Faktoren der linearen und zirkularen Polarisation berechnen.

Bei der kritischen Wellenlänge $\lambda_c = 0.148 \text{ nm}$ beträgt zum Beispiel die Halbwertstrecke (FWHM) = 0.28 mrad; bei einer Wellenlänge von $\lambda = 14.8 \text{ nm}$ ist diese 1.8 mrad. Die absoluten Verläufe der azimuthalen Verteilung (siehe Abb. 68) zeigen, wie kollimiert die Synchrotronstrahlung ist.

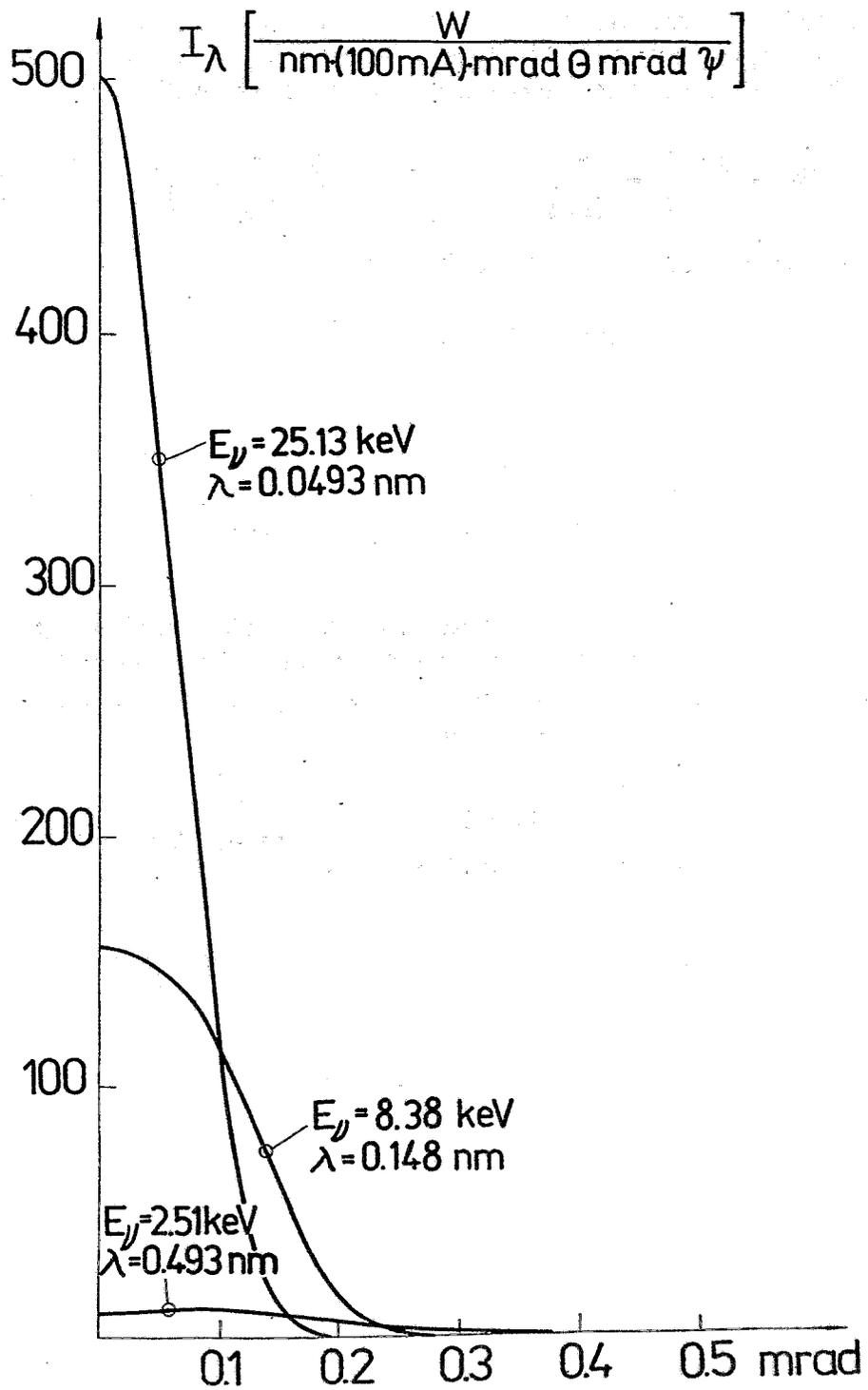


Abb. 68: Azimutale Verteilung der spektralen Strahlstärke I_λ der Synchrotronstrahlung von ROSY I.

Für viele Anwendungen ist nicht die Leistung der Synchrotronstrahlung, wiedergegeben durch die spektrale Strahlstärke I_λ , sondern der spektrale Photonenfluß N_λ von Interesse. Beide Größen sind wie folgt miteinander verknüpft:

$$N_\lambda = \frac{I_\lambda \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{\lambda_c}{h \cdot c} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_c} \cdot I_\lambda = \frac{4 \pi \rho}{3 \gamma^3 hc} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right) \cdot I_\lambda \quad (52)$$

Oder in einer Zahlenwertgleichung:

$$N_\lambda = 2.109 \cdot 10^{25} \cdot \frac{1}{W \cdot s} \cdot \left(\frac{\rho/m}{\gamma^3}\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right) \cdot I_\lambda \quad (53)$$

Durch Einsetzen von I_λ folgt hieraus:

$$N_\lambda = 8.263 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{Photonen}}{s \cdot \text{nm} \cdot \text{rad } \theta \text{ rad } \psi} \cdot \frac{(I/A) \cdot \gamma^5}{(\rho/m)} \cdot y^3 \cdot F^*(yx) \quad (54)$$

Bei spektroskopischen Experimenten wird ein Auflösungsvermögen vorgegeben und es sind die Photonen $N_{\Delta\lambda}$ innerhalb einer spektralen Breite von $\Delta\lambda$ von Bedeutung. Mit der Bandbreite $BW = \Delta\lambda/\lambda$ ergibt sich diese zu:

$$N_{\Delta\lambda} = 1.326 \cdot 10^{13} \cdot \frac{\text{Photonen}}{s \cdot 0.1 \% BW \cdot \text{mrad } \theta \cdot \text{mrad } \psi} \cdot (I/A) \cdot (E/\text{GeV})^2 \cdot y^2 \cdot F^*(yx) \quad (55)$$

$$N_{\Delta\lambda} = N_\lambda \cdot \Delta\lambda = N_\lambda \cdot BW \cdot \lambda = N_\lambda \cdot \lambda_c \cdot BW \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)$$

$$N_{\Delta\lambda} = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{\rho}{\gamma^3} \cdot BW \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right) \cdot N_\lambda = 4.189 \cdot 10^9 \text{nm} \cdot \left(\frac{\rho/m}{\gamma^3}\right) \cdot BW \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right) \cdot N_\lambda$$

$$N_{\Delta\lambda} = 4.189 \cdot 10^6 \text{nm} \cdot \left(\frac{\rho/m}{\gamma^3}\right) \cdot 0.1 \% BW \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right) \cdot N_\lambda \quad (56)$$

Durch Einsetzen von N_λ folgt die Zahlenwertgleichung:

$$N_{\Delta\lambda} = 3.461 \cdot 10^{12} \cdot \frac{\text{Photonen}}{s \cdot 0.1 \% BW \cdot \text{rad } \theta \cdot \text{rad } \psi} \cdot (I/A) \cdot \gamma^2 \cdot y^2 \cdot F^*(yx) \quad (57)$$

Die azimutale Verteilung des Photonenflusses für verschiedene Wellenlängen sind in Abb. 69 wiedergegeben.

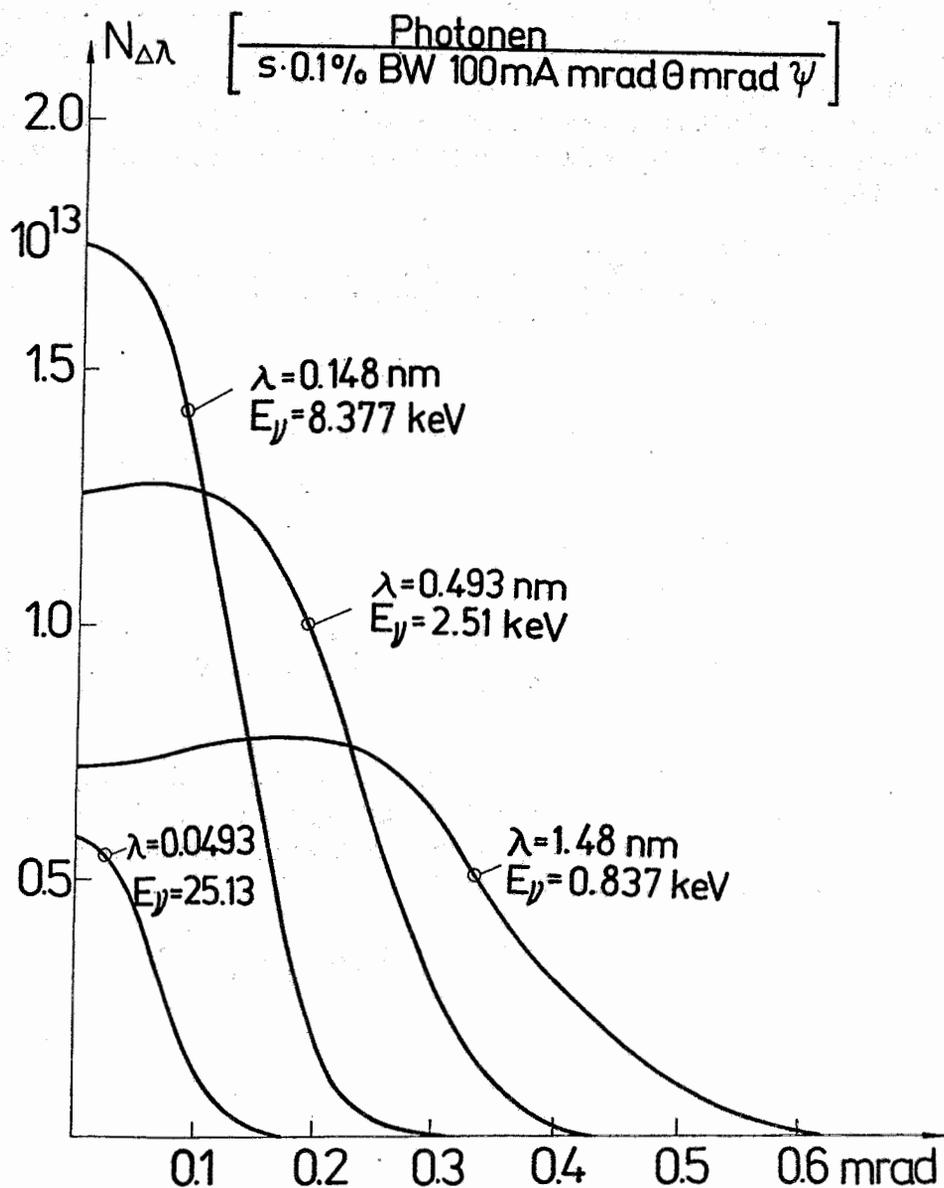


Abb. 69: Azimutale Verteilung der Photonenzahl innerhalb einer vorgegebenen Bandbreite BW (BW = 0.1 % = $\Delta\lambda/\lambda$) bei einem Strom von 100 mA.

Bei Photonenergien von 837 eV, entsprechend eine Wellenlänge von $\lambda = 1.48$ nm, erstreckt sich die azimutale Verteilung um einen Winkel von $\Delta\psi = \pm 0.4$ mrad. Für Photonenergien von 100 eV ($\lambda = 12.4$ nm) vergrößert sich der Öffnungswinkel bis auf $\Delta\psi = \pm 1.5$ mrad. Bei ROSY I kann in einer Entfernung von $D = 6,66$ m vom Quellpunkt im Ablenkmagneten der erste kollimierende Spiegel angebracht werden. Hat dieser eine

Breite von $B = 100 \text{ mm}$, so erfaßt er in beiden Richtungen einen Winkel von $\Delta\psi = \pm 7.5 \text{ mrad}$ (siehe Abb. 66). Für die azimutale Richtung bedeutet dies, daß die gesamte Strahlungskeule erfaßt wird. Der spektrale Strahlungsfluß durch diese experimentelle Anordnung ergibt sich entsprechend der Synchrotronstrahlungstheorie zu [31]:

$$\phi_\lambda = \frac{3^{5/2}}{(4\pi)^3} \cdot \frac{e}{\epsilon_0} \cdot \frac{I}{\rho^2} \cdot \theta \cdot \gamma^7 \cdot G_3\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right), \quad (58)$$

$$G_3\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^3 \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\eta) \cdot d\eta \quad (59)$$

oder in einer Zahlenwertgleichung:

$$\phi_\lambda = 1.422 \cdot 10^{-19} \frac{(I/A) \cdot (\theta/\text{rad})}{(\rho/\text{m})^2} \cdot \gamma^7 \cdot \frac{W}{\text{nmrad} \theta} \cdot G_3\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \quad (60)$$

Mit den weiter oben bereits angegebenen Zusammenhängen zwischen der spektralen Strahlstärke I_λ , des spektralen Photonенflusses N_λ und der Photonenzahl $N_{\Delta\lambda}$ errechnen sich diese Größen aus dem spektralen Strahlungsfluß zu:

$$N_\lambda = \frac{3^{3/2}}{(4\pi)^2} \cdot \frac{e}{\epsilon_0 \cdot h \cdot c} \cdot \frac{I}{\rho} \cdot \theta \cdot \gamma^4 \cdot G_2\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \quad (61)$$

$$G_2\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2 \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\eta) \cdot d\eta \quad (62)$$

$$N_\lambda = 2.998 \cdot 10^6 \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{nm} \cdot \text{rad} \theta} \cdot \frac{(I/A)}{(\rho/\text{m})} \cdot (\theta/\text{rad}) \cdot \gamma^4 \cdot G_2\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \quad (63)$$

$$N_{\Delta\lambda} = \frac{3^{1/2}}{4\pi} \cdot \frac{e}{\epsilon_0 \cdot h \cdot c} \cdot I \cdot \theta \cdot \text{BW} \cdot \gamma \cdot G_1\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \quad (64)$$

$$G_1\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}(\eta) \cdot d\eta \quad (65)$$

$$N_{\Delta\lambda} = 1.256 \cdot 10^{13} \cdot \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot \text{BW} \cdot \text{mrad} \theta} \cdot (I/A) \cdot (\theta/\text{mrad}) \cdot \text{BW} \cdot \gamma \cdot G_1\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \quad (66)$$

Diese Gleichung kann auch wie folgt umgeschrieben werden [33]:

$$N_{\Delta\lambda} = 2.458 \cdot 10^{13} \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot 0.1\% \text{BW} \cdot \text{mrad} \cdot \theta} \cdot (E/\text{GeV}) \cdot (I/\text{A}) \cdot (\theta/\text{mrad}) \cdot G_1 \left(\frac{\lambda_c}{\lambda} \right) \quad (67)$$

Die Abhängigkeit des spektralen Strahlungsflusses I_λ , des Photonenflusses N_λ und der Photonenzahl $N_{\Delta\lambda}$ sind in den folgenden Abbildungen 70, 71 und 72 wiedergegeben.

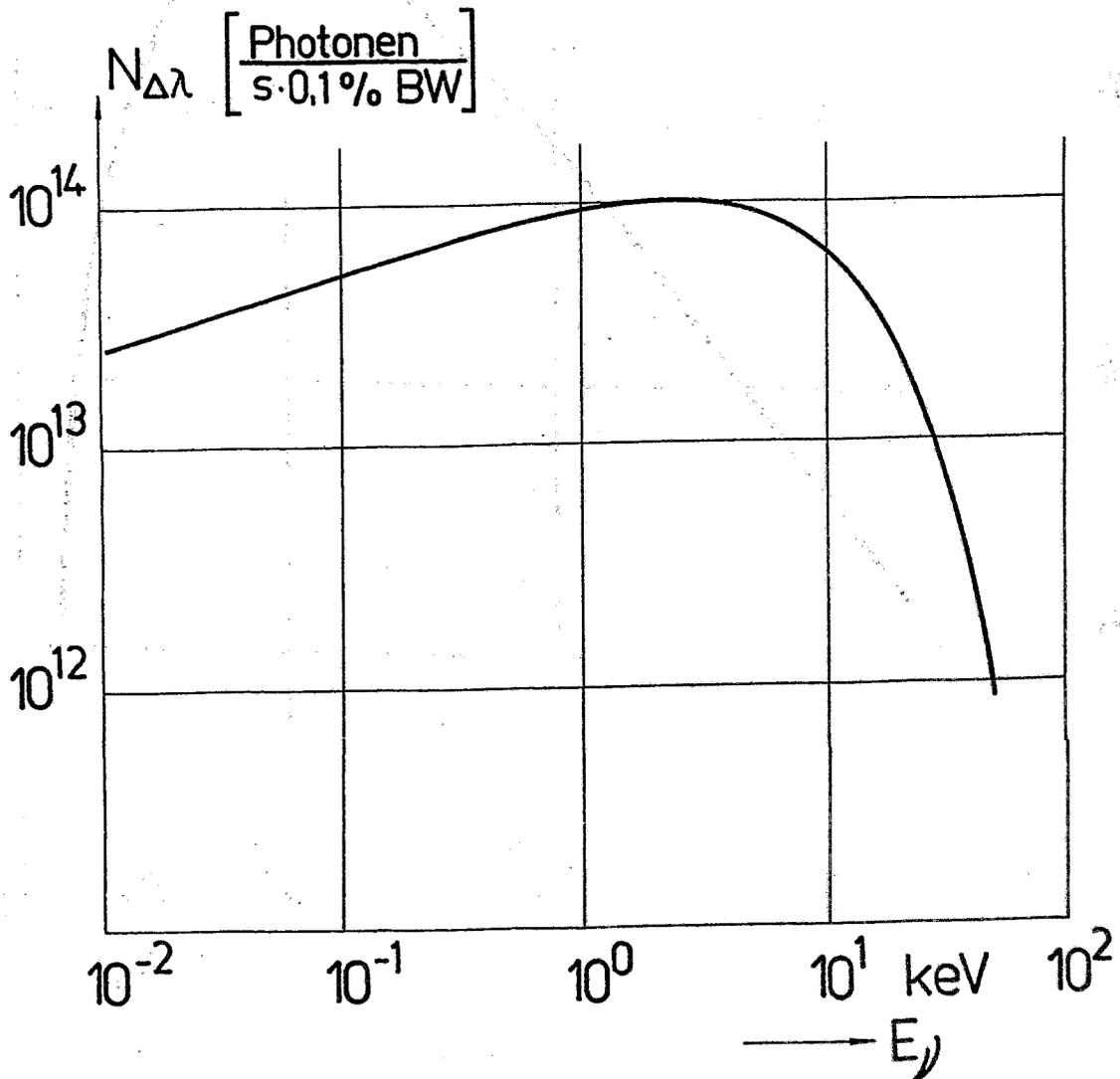


Abb. 70: Photonenfluß des Sy-Strahlung von ROSY I bei einem Strom von $I = 100$ mA, sowie einer horizontalen Akzeptanz von 15 mrad und einer Bandbreite von 0.1 %

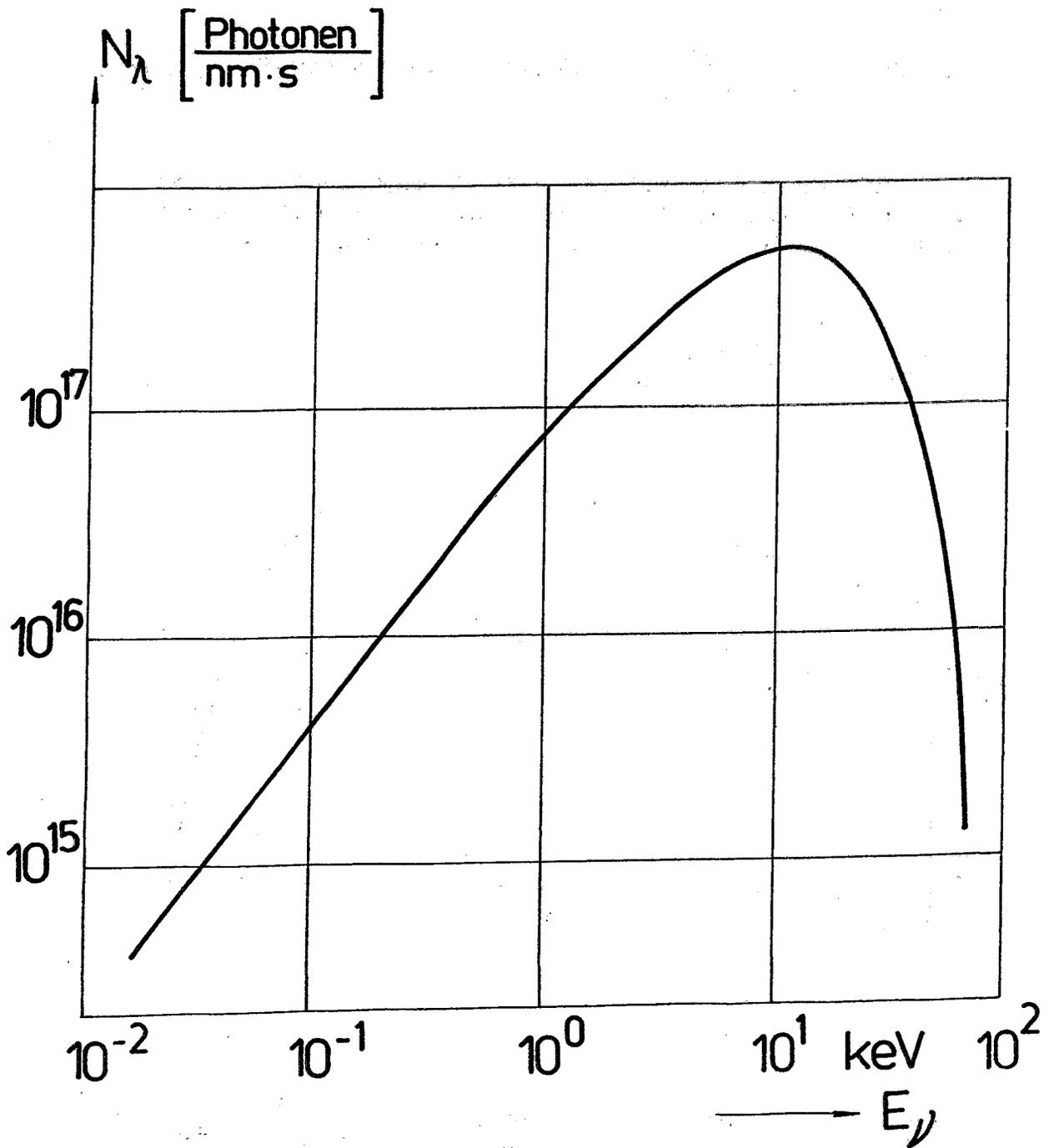


Abb. 71: Spektraler Photonenfluß der Sy-Strahlung von ROSY I bei einem Strom von $I = 0.1$ A und einer horizontalen Akzeptanz von 15 mrad, wobei in der vertikalen Ebene die gesamte Strahlungskeule erfaßt wird.

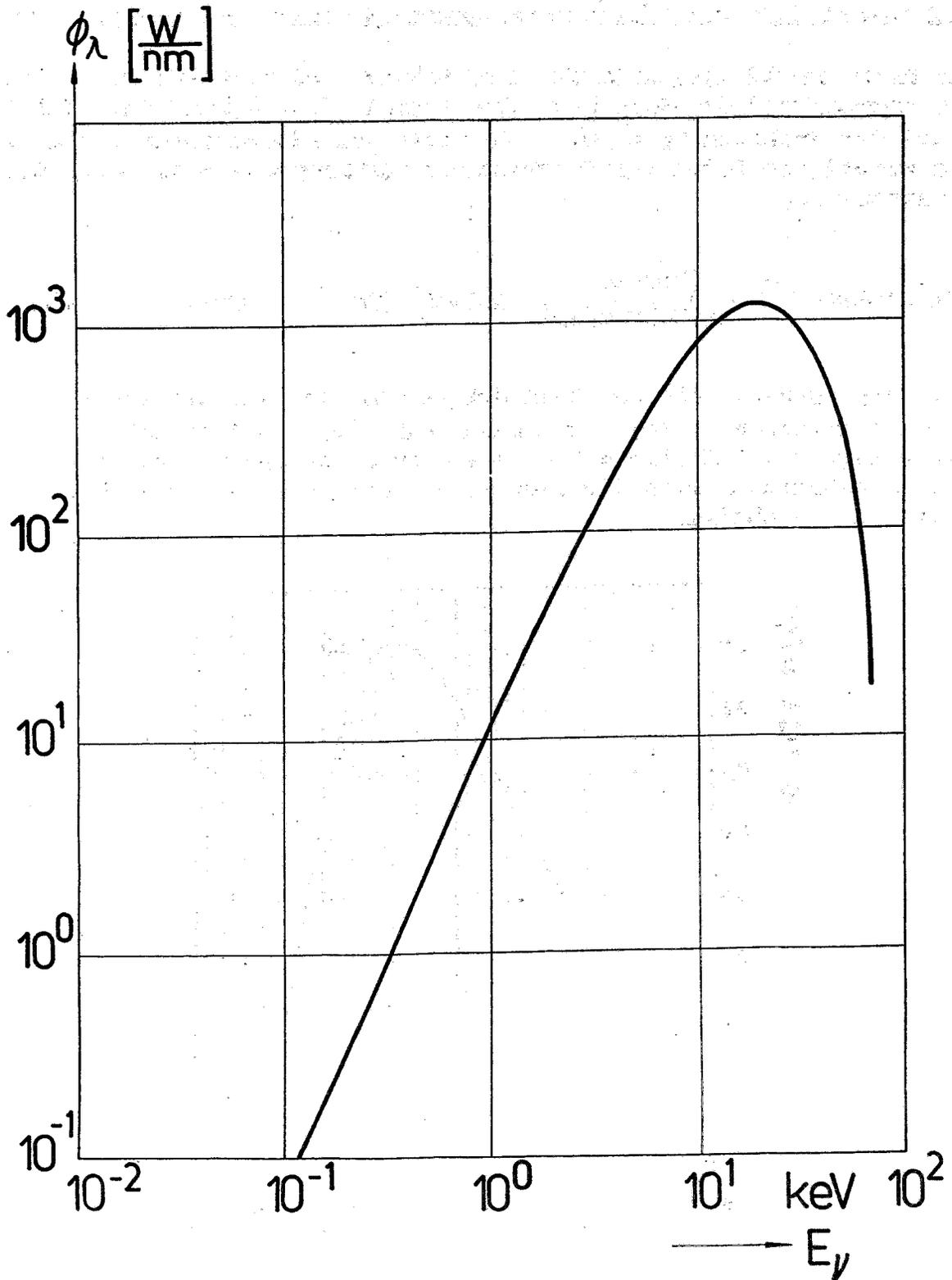


Abb. 72: Spektrale Strahlungsleistung des Sy-Strahlung von ROSY I bei einem Strom von $I = 0.1$ A und einer horizontalen Akzeptanz von 15 mrad. In der vertikalen Ebene wird die gesamte Strahlungskeule erfaßt.

8.2 Vergleich verschiedener Synchrotronstrahlungsquellen

Die Photonenzahl $N_{\Delta\lambda}$ pro Bandbreite, Sekunde und horizontalen Winkel ist proportional der Energie E , dem Strom I , dem horizontalen Winkel θ und der Funktion $G_1(\lambda_c/\lambda)$. Für viele Experimentatoren ist dies die wichtigste Größe der Synchrotronstrahlung und somit soll der Zusammenhang:

$$N_{\Delta\lambda} = 2.458 \cdot 10^{13} \frac{\text{Photonen}}{\text{s} \cdot 0.1\% \text{BW} \cdot \text{mrad}} \cdot (E/\text{GeV}) \cdot (I/\text{A}) \cdot (\theta/\text{mrad}) \cdot G_1\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) \quad (68)$$

als Ausgangspunkt für den Vergleich von Synchrotronstrahlungsquellen genommen werden. Die Funktion $G_1(\lambda_c/\lambda)$ ist in Abb. 73 wiedergegeben. Auffallend ist, daß über einen Spektralbereich von 3-Zehnerpotenzen die Anzahl $N_{\Delta\lambda}$ nur über eine halbe Zehnerpotenz abnimmt.

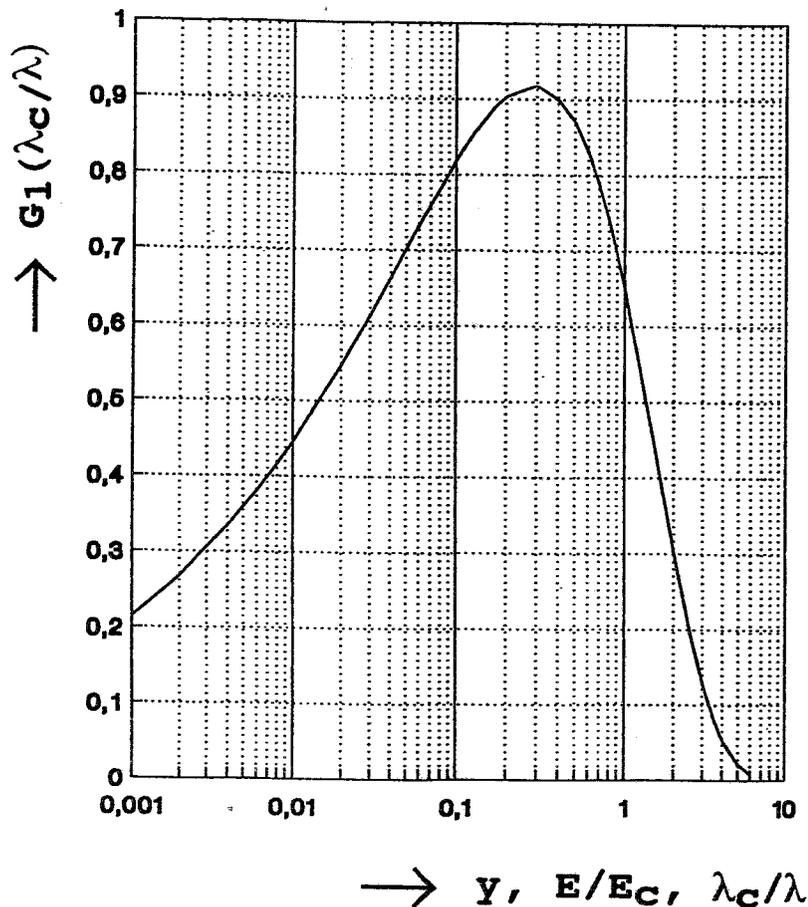


Abb. 73: Spektrale Abhängigkeit Funktion $G_1(\lambda_c/\lambda)$ der Photonenzahl $N_{\Delta\lambda}$ der Synchrotronstrahlung.

Die Anwendung der oben wiedergegebenen Gleichung für den Photonenfluß ergibt für ROSY II einen maximalen Wert bei $\Delta\theta = 1$ mrad und einem Strom von $I = 100$ mA von $N_{\Delta\lambda} = 6.8 \cdot 10^{12}$ Photonen / (s \cdot 0.1 % BW \cdot mrad θ). Dies ist in Übereinstimmung mit Abb. 60.

Bei den Undulatoren und Wigglern werden die Größen: spektraler Photonenfluß F_{λ} , Brightness B_{λ} und Brillanz B_I zur Beschreibung der Eigenschaften dieser Strahlungsquellen verwandt (siehe Abschnitt 6). Für die Synchrotronstrahlung sind diese nicht optimal, denn

- 1) in der azimutalen Richtung wird die gesamte Strahlungskeule erfaßt und
- 2) ist die am Eintritts- bzw. Austrittspunkt eines Monochromators erzeugte Photonendichte für experimentelle Untersuchungen ausschlaggebend.

Insbesondere zur Berücksichtigung des 2. Punktes wird entsprechend den radiometrischen Einheiten [36] eine Photonenausstrahlung M_{ν} definiert:

$$M_{\nu} = \frac{N_{\Delta\lambda}}{S} \quad (69)$$

wobei $N_{\Delta\lambda}$ die weiter oben beschriebene Photonenzahl und S die Quellgröße ist. Mit der Abhängigkeit der Quellgröße von den Maschinenparametern:

$$S = 4 \sigma_x \sigma_y = 4 \sqrt{\epsilon_x \beta_x} \cdot \sqrt{\epsilon_y \beta_y} = 4 \sqrt{\epsilon_x \beta_x} \cdot \sqrt{k \epsilon_x \beta_y} = 4 \epsilon_x \sqrt{k} \cdot \sqrt{\beta_x \beta_y} \quad (70)$$

ergibt sich die Photonenausstrahlung zu:

$$M_{\nu} = \frac{N_{\Delta\lambda}}{4 \epsilon_x \cdot \sqrt{\beta_x \beta_y} \cdot \sqrt{k}} \quad (71)$$

k ist dabei der Kopplungsfaktor zwischen den Emittanzen in der X- und Y-Richtung.

Die Photonenzahl ist davon abhängig, wie groß der maximale horizontale Winkel $\Delta\theta$ im Strahlrohr ist. Bei einer vorgegebenen Breite B des entsprechenden optischen Elementes (Kollimatorspiegel) ist $\Delta\theta$ eine Funktion des Abstandes vom Quellpunkt im Ablenkmagneten. Für ROSY I wurde ein Öffnungswinkel von $\theta = 10$ mrad gewählt (siehe Abb. 66).

Beim Vergleich von Synchrotronstrahlungsquellen müssen nicht nur die Quellgrößen sondern auch der Öffnungswinkel $\Delta\theta$ berücksichtigt werden. Bei größeren Maschinen wird $\Delta\theta$ kleiner, da der erste kollimierende Spiegel erst in einem relativ weiten Abstand D vom Quellpunkt aufgestellt werden kann. In einer ersten Näherung wird angenommen, daß dieser Abstand D proportional zum mittleren Radius R des Beschleunigers ist (siehe Abb. 66).

Unter Berücksichtigung dieser Punkte ist das Verhältnis der Photonenausstrahlung $M_{\text{ROSY I}}$ zu der einer anderen Synchrotronstrahlungsquelle M_x gegeben durch:

$$\frac{M_{\text{ROSY I}}}{M_x} = \frac{(N_{\Delta\lambda})_{\text{ROSY I}}}{(N_{\Delta\lambda})_x} \cdot \frac{(\epsilon_x \sqrt{\beta_x \beta_y})_x}{(\epsilon_x \sqrt{\beta_x \beta_y})_{\text{ROSY I}}} \cdot \frac{R_x}{R_{\text{ROSY I}}} \quad (72)$$

Die aufgrund dieser Kriterien berechneten Photonenausstrahlungen der verschiedenen Synchrotronstrahlungsquellen sind in der folgenden Abbildung 74 wiedergegeben. Die verwendeten Parameter der verschiedenen Maschinen sind in Tabelle 15 zusammengestellt.

RING	E [GeV]	E _c [keV]	E ₀ [keV]	R [m]	β _x [m/rad]	β _y [m/rad]	ε _x [mm mrad]	M _v (ε ₀)
BESSY II	1.7	2.60	0.78	30.23	1.3	2.5	0.0062	178.0
KfK-Quelle	2.4	6.26	1.88	11.08	1.5	7.0	0.7	3.38
LISA	2.5	6.19	1.86	19.10	0.7	11.0	0.02	83.5
SLM	2.5	6.23	1.87	19.10	2.0	6.0	0.3	4.46
ROSY I	3.0	8.38	2.51	19.10	1.1	10.0	0.04	41.9
ROSY II	3.2	9.08	2.72	47.70	0.6	12.0	0.003	295.0
DORIS	4.5	16.70	5.01	44.60	3.0	22.0	0.430	1.02
ESRF	6.0	19.20	5.76	103.5	1.0	25.0	0.0062	66.2

Tab. 15: Zusammenstellung der Faktoren zur Berechnung der Photonenausstrahlung an verschiedenen Synchrotronstrahlungsquellen. ε₀ ist die Photonenenergie bei der M_v ein Maximumdurchläuft. M_v ist angegeben in 10¹³ Photonen / s mm² 0.1%BW.

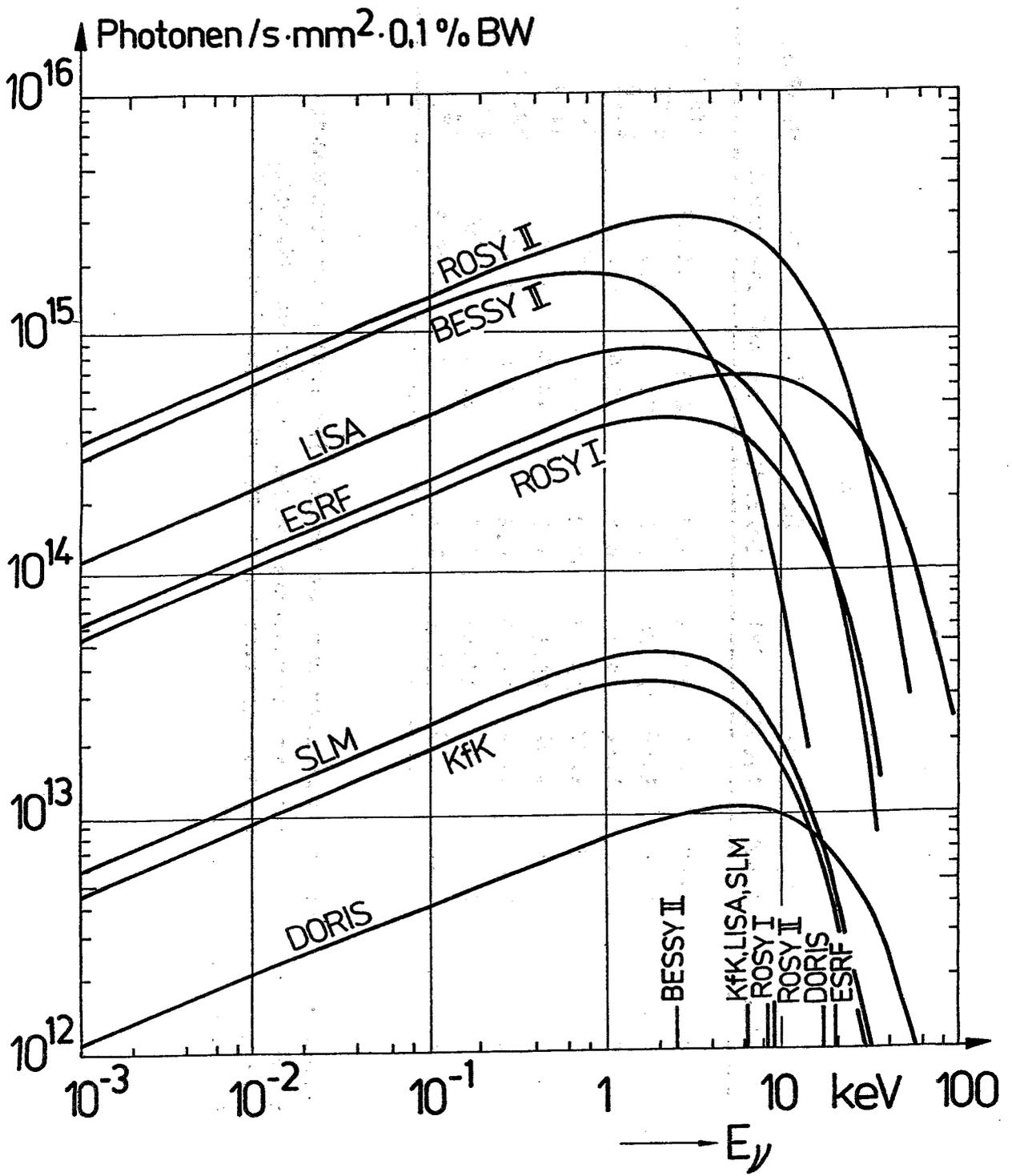


Abb. 74: Spektrale Photonenausbeute an verschiedenen Synchrotronstrahlungsquellen

Entsprechend der Funktion $G_1(\lambda_c/\lambda)$ ist der relative Verlauf der Photonenabstrahlung bei allen Synchrotronstrahlungsquellen gleich. Die Absolutwerte sind im wesentlichen bestimmt durch die Quellgröße S des Elektronenstrahls. Dies führt dazu, daß ROSY II die größte und DORIS die kleinste Photonenabstrahlung M_v hat. Der mittlere Radius R ist ebenfalls von Einfluß, denn dieser führt dazu, daß die Werte von M_v für die ESRF um etwa den Faktor 8 kleiner sind als bei ROSY II und BESSY II. Der Unterschied in den Werten für die Quellen LISA, ROSY I und SLM ist nur durch die Quellgröße gegeben. Bei der KfK-Quelle führt wiederum der kleinere mittlere Radius dazu, daß die Photonenabstrahlung in etwa genauso groß ist wie bei der SLM.

8.3 Brillanz der Synchrotronstrahlung in Ablenkmagneten

Wie im Abschnitt 6 angegeben ist die Brillanz definiert als der Photonenfluß in tangentialer Richtung ($\psi = 0$) pro Raumwinkel- und Strahlungsflächeneinheit:

$$\text{Brillanz (BI)} = \frac{\text{Photonen}}{s \cdot 0.1\% \text{BW} \cdot \text{mrad} \cdot \theta \cdot \text{mrad} \cdot \psi \cdot \text{mm}^2} \Bigg|_{\psi=0} \quad (73)$$

Mit der weiter oben definierten Photonenabstrahlung steht die Brillanz im folgenden Zusammenhang:

$$\text{BI} = \frac{M_v(\theta = 1 \text{ mrad})}{\Delta\psi} \Bigg|_{\psi=0} = \frac{M_v(\theta = 1 \text{ mrad})}{1 \text{ mrad} \cdot \psi} \Bigg|_{\psi=0} \quad (74)$$

Zur Bestimmung der Brillanz muß somit der Photonenfluß $N_{\Delta\lambda}$ in tangentialer Richtung ($\psi = 0$) berechnet werden. Mit der Auswertung der Besselfunktionen für $\psi = 0$ und unter Verwendung des Öffnungswinkels $\Delta\theta = \Delta\psi = 1 \text{ mrad}$ ergibt sich für den Photonenfluß in tangentialer Richtung die Zahlenwertgleichung [31], [37]:

$$N_{\Delta\lambda}(\psi = 0) = 1.326 \cdot 10^{13} \frac{\text{Photonen}}{s \cdot 0.1\% \text{BW} \cdot \text{mrad} \cdot \theta \cdot \text{mrad} \cdot \psi} \cdot (E/\text{GeV})^2 \cdot (I/A) \cdot H_2(y) \quad (75)$$

$$H_2(y) = y^2 \cdot K_{2/3}^2(y/2) \quad (76)$$

Die Funktion $H_2(y)$ ist in Abb. 76 wiedergegeben.

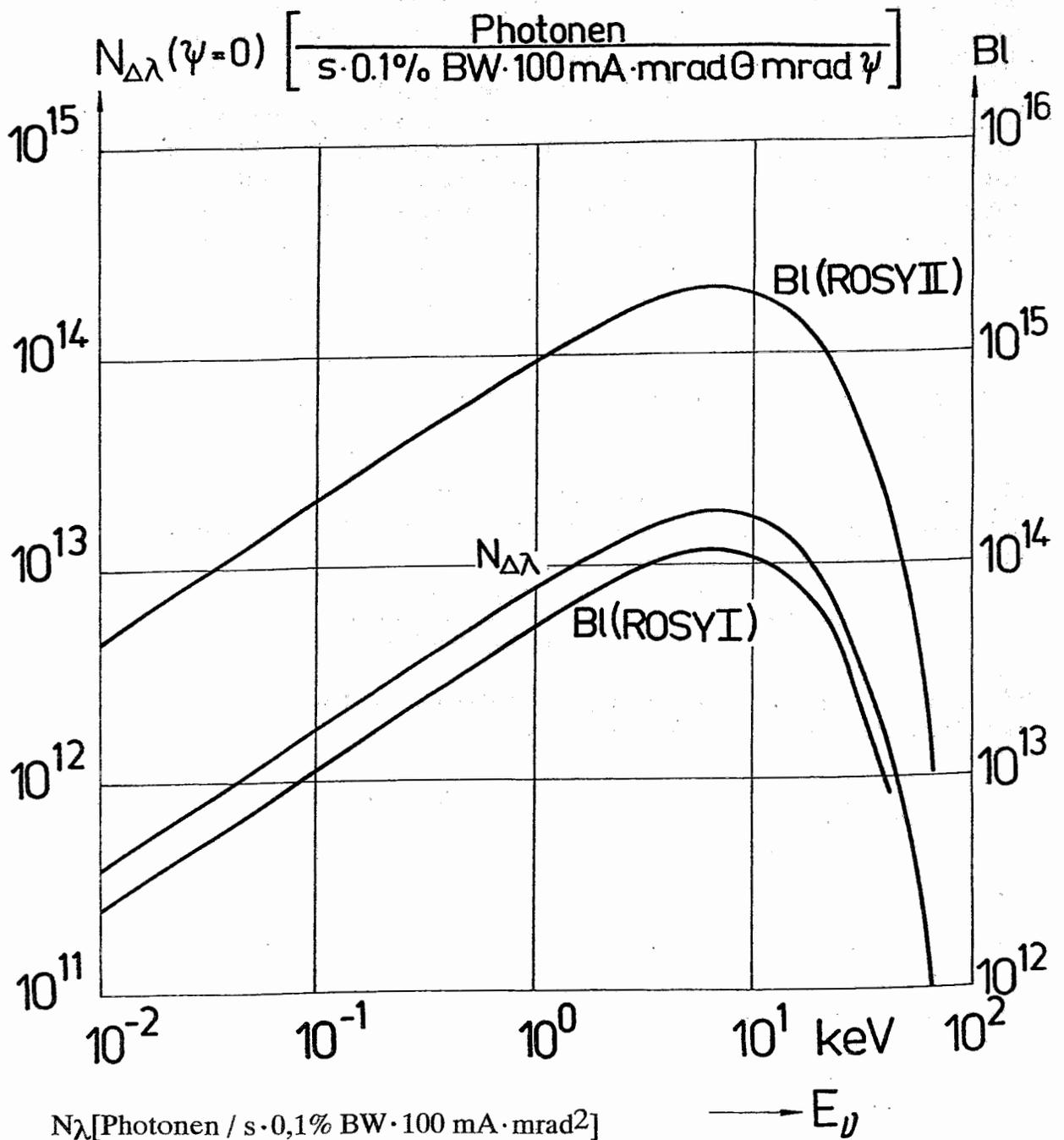


Abb. 75: Spektraler Photonenfluß $N_{\Delta\lambda}$ in tangentialer Richtung ($\psi = 0$) der in den Ablenkmagneten von ROSY I erzeugten Synchrotronstrahlung und die Brillanz in den Ablenkmagneten von ROSY I und ROSY II.

Diese Gleichung angewandt auf ROSY I und ROSY II mit $E = 3$ GeV ist in Abb. 75 dargestellt. Die Division dieser Größe durch die Quellgröße $S = 4\sigma_x\sigma_y$ ergibt die Brillanz. An ROSY II ergeben sich in der Mitte des Ablenkmangeten nach Abb. 55 die Standortabweichungen $\sigma_x = 35 \mu\text{m}$ und $\sigma_y = 60 \mu\text{m}$. Die mit diesen Werten berechneten Brillanzen im Ablenkmangeten von ROSY II sind ebenfalls in Abb. 57 wiedergegeben. Für ROSY I ergeben sich in dem Ablenkmangeten die Standortabweichungen $\sigma_x = 0.17 \text{ mm}$ und $\sigma_y = 0.22 \text{ mm}$, somit ist die Brillanz von ROSY I um den Faktor 17.8 kleiner. Die Brillanz von ROSY I ist ebenfalls in Abb. 57 wiedergegeben. Zu vergleichen ist das Verhältnis mit dem der Photonenausbeute, die sich nach Abb. 56 zu 6.8 ergibt. Hiermit soll abschließend darauf hingewiesen werden, daß die Brillanz keine Größe zum Vergleich von Synchrotronstrahlungsquellen ist.

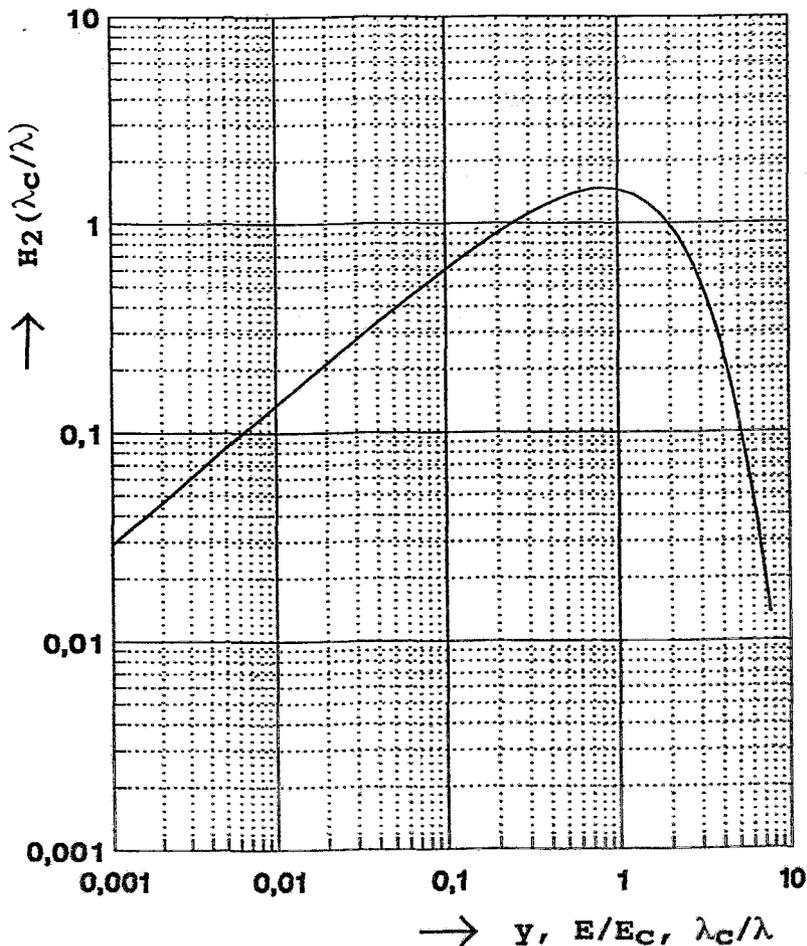


Abb. 76: Verlauf der Funktion $H_2(y)$ zur Berechnung der Brightness und Brillanz der Synchrotronstrahlung in Ablenkmangeten.

9. ANHANG

9.1 Beugungsbegrenzte Strahlungsquellen

Durch Beugungseffekte am Elektronenstrahl und auch am Photonenstrahl selbst hat der Photonenstrahl im Undulator eine Ausdehnung und eine Divergenz. Die Ausdehnung und die Divergenz bestimmen aber die Emittanz. Mit den unter 6 wiedergegebenen Werten von σ_r und σ_r' läßt sich die Emittanz des Undulatorstrahles angeben. Nach R. P. Walcker [14] gelten folgende Werte.

$$\sigma_r = 0.15 \sqrt{\lambda \cdot L} \quad \text{und} \quad \sigma_r' = 1.30 \sqrt{\frac{\lambda}{L}} \quad (77)$$

Hieraus ergibt sich eine Emittanz:

$$\varepsilon_r = \sigma_r \cdot \sigma_r' = 0.195 \cdot \lambda \quad (78)$$

Synchrotronstrahlungsquellen, bei denen die Ausdehnung und die Divergenz nicht durch den Elektronenstrahl bestimmt sind, werden als beugungsbegrenzte Strahlungsquellen bezeichnet.

Für eine beugungsbegrenzte Strahlungsquelle muß gelten:

$$\varepsilon_x \varepsilon_y \leq \varepsilon_r^2 \quad (79)$$

Oder auch unter der Annahme einer 10%-igen Kopplung zwischen der x- und der y-Emittanz:

$$\varepsilon_x \cdot \frac{1}{10} \varepsilon_x \leq \varepsilon_r^2 \rightarrow \varepsilon_x \leq \sqrt{10} \varepsilon_r \leq 3.16 \varepsilon_r \quad (80)$$

oder auch:

$$\varepsilon_x \leq 0.62 \cdot \lambda \quad (81)$$

Unter Verwendung des Gleichheitszeichens kann die Emittanz ε_x für alle Wellenlängen berechnet werden. Diese Kurve ist in Abb. 78 als "Diffraction Limited" wiedergegeben. In dieser Abbildung können zu den "Peak"-Wellenlängen der Undulatorstrahlung die Emittanzen aufgetragen werden, und somit ergibt sich eine Aussage, wie weit ein Undulator vom Betrieb als beugungsbegrenzte Strahlungsquelle entfernt ist. Bei ELETTRA ist der Betrieb um 1.3 GeV beugungsbegrenzt. Für 2 GeV liegt man weit darüber.

Eine Synchrotronstrahlungsquelle mit einer Energie um 1.7 GeV und einem QBA-Lattice (siehe BXSJ in Abb. 78) wird auch schon bei 2 GeV beugungsbegrenzt sein [9].

ROSY II wird unterhalb von 2.1 GeV beugungsbegrenzt arbeiten. Bei 3 GeV ist man in etwa eine Zehnerpotenz von dem Grenzwert "beugungsbegrenzt" entfernt.

Um eine beugungsbegrenzte Synchrotronstrahlungsquelle bei einer Energie von 3 GeV zu erreichen, muß die Ablenkung pro Magnet auf etwa 5° reduziert werden. Ein Achromat wird dann, um die Maschine nicht zu groß zu machen, aus 5 Einheitszellen und 2 Anpassungszellen aufgebaut. Ein erstes Konzept für eine beugungsbegrenzte Strahlungsquelle DIFL ist in Abb. 79 wiedergegeben. Bei einem Umfang von 450 m sollten sich Emittanzen von $\epsilon_x = 0.4$ nrad erreichen lassen. Nach Abb. 78 liegt diese Quelle eindeutig im Bereich der beugungsbegrenzten Strahlungsquellen. (siehe Wert für DIFL)

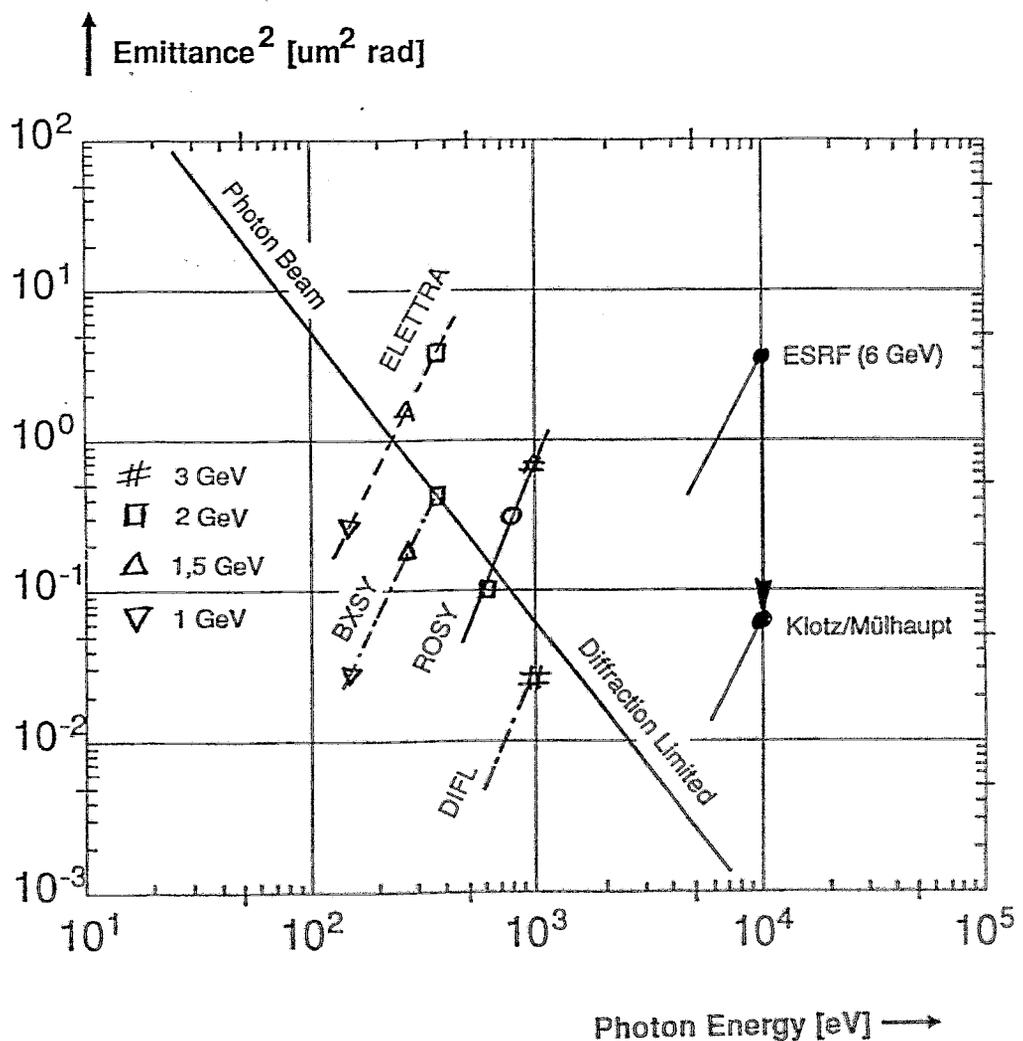
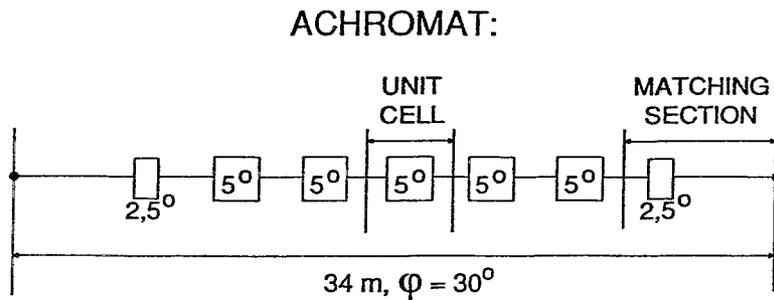
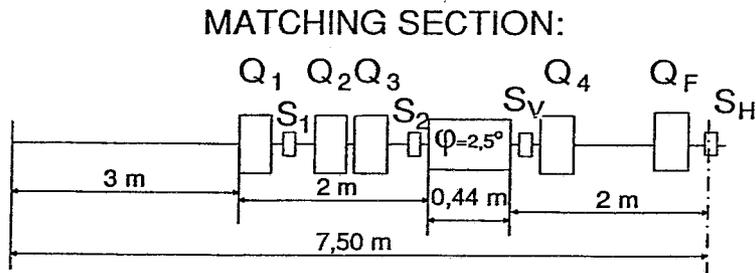
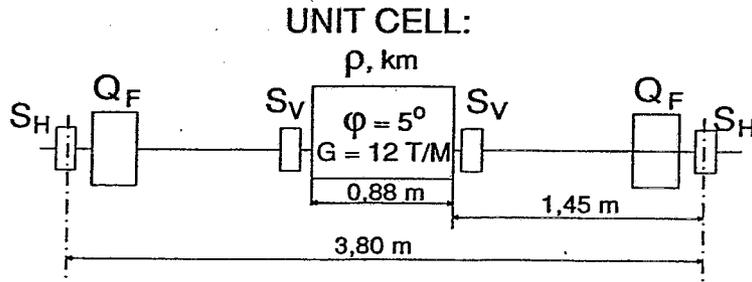


Abb. 78: Abgrenzung von beugungsbegrenzten Strahlungsquellen

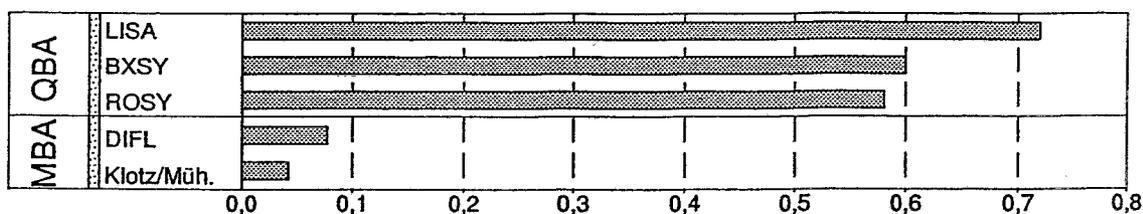
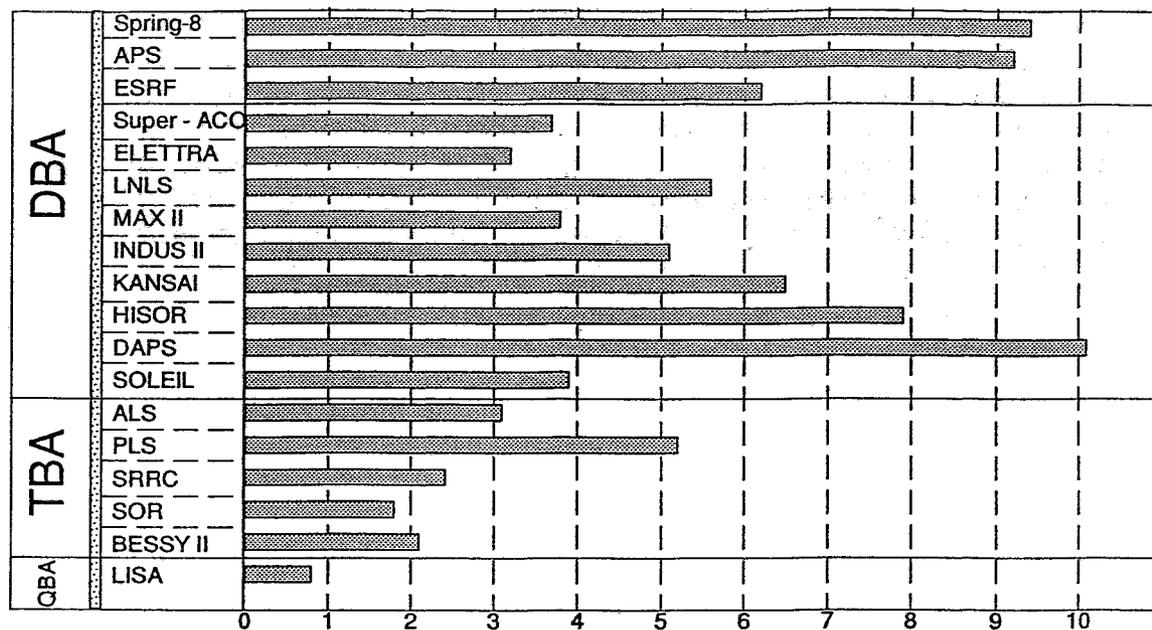
3 GeV Diffraction Limited Light Source (DIFL)

Circumference = 440 m, Emittance ≈ 0.4 nmrاد



$C = 440 \text{ m}, \mathcal{E}_x \approx 0.4 \text{ nmrاد}$

Abb. 79: Erste Konzeption für eine beugungsbegrenzte Strahlungsquelle



Normalized emittance ϵ_n in [$\mu\text{m N c}^3/\text{GeV}^2$]

Abb. 80: Vergleich verschiedener Synchrotronstrahlungsquellen mittels normierter Emittanz

Ein Vergleich mit anderen Maschinen kann über die normierte Emittanz erfolgen. Dies ist in Abb. 80 geschehen, die ohne den unteren Absatz von Wrulich [27] erstellt wurde.

Bei der Diskussion um eine neue Synchrotronstrahlungsquelle in der Bundesrepublik Deutschland sollte auch der Punkt der beugungsbegrenzten Strahlungsquellen mit berücksichtigt werden. Diese Diskussion sollte jedoch im engen Kontakt mit den Synchrotronstrahlungsnutzern geführt werden.

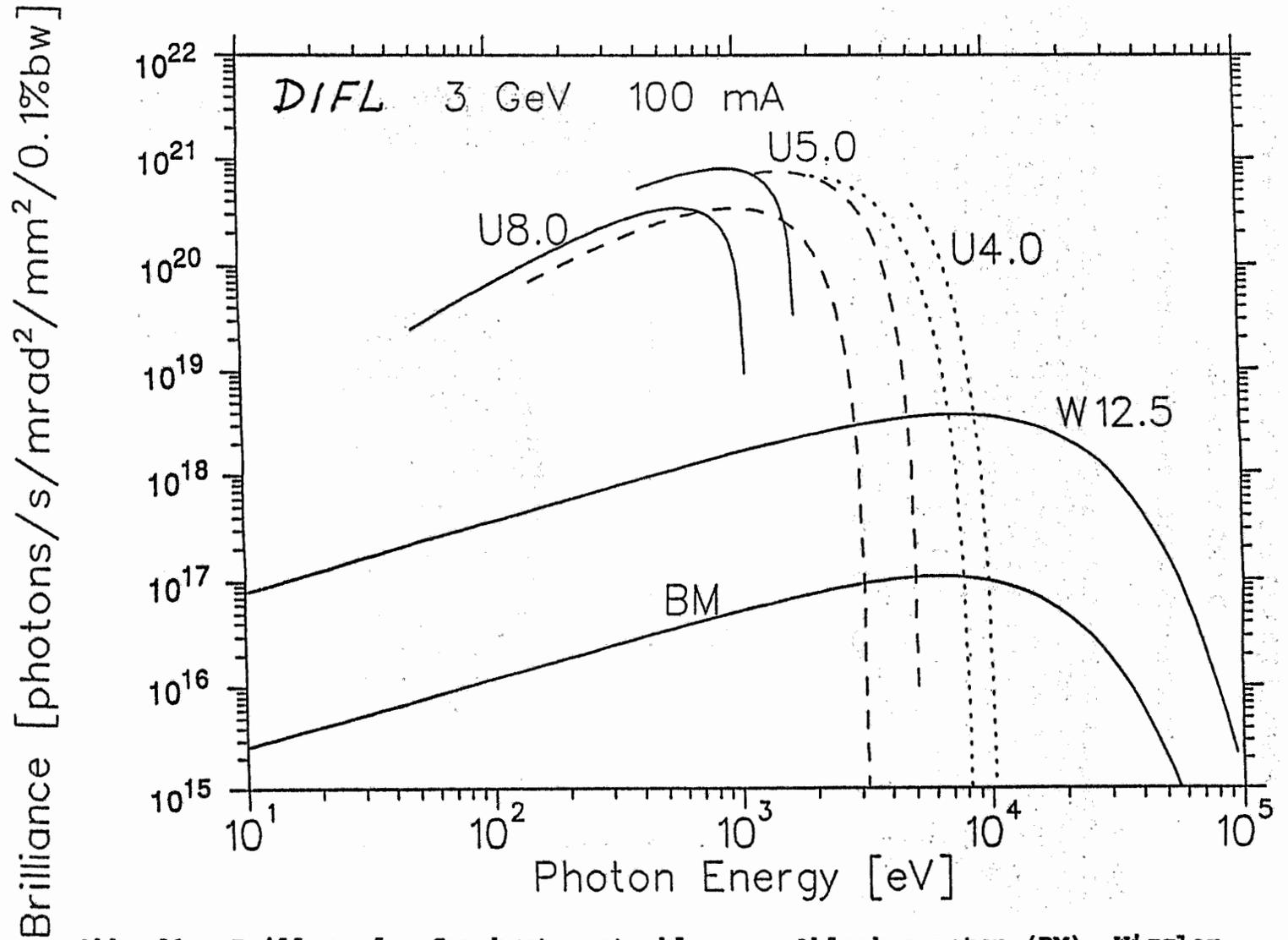


Abb. 81: Brillanz der Synchrotronstrahlung am Ablenkmagneten (BM), Wiggler (W 12.9) und den Undulatoren erzeugt mit einer beugungsbegrenzten Synchrotronstrahlungsquelle DIFL:

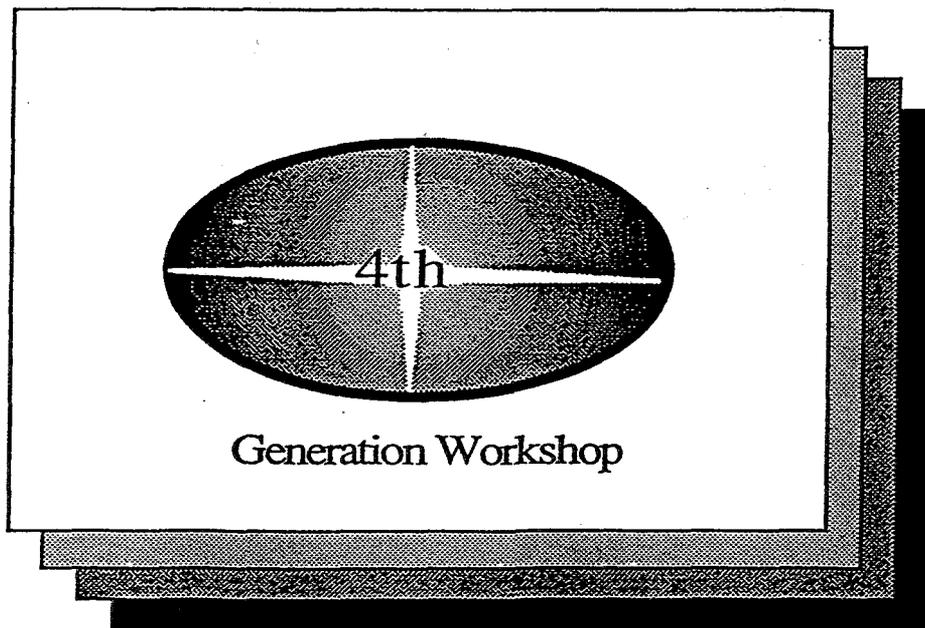
A Modified QBA Optics for Low Emittance Storage Rings

D. Einfeld* and M. Plesko**

* Fachhochschule Ostfriesland, ** Sincrotrone Trieste

Abstract:

A modified quadruple bend achromat (QBA) optics as a lattice for a low emittance storage ring is presented. The novel feature of this lattice is the use of horizontally defocussing bending magnets with different bending angles to keep the radiation integrals low. A realistic storage ring with six achromats, non-dispersive straight sections of 4.6 m each and a total circumference of 124.8 m is studied. At an energy of 2.5 GeV the emittance yields only 20π nm rad. The chromaticities and the sextupole strengths are moderate, the dynamic aperture is large and the momentum acceptance is more than $\pm 9\%$ relative. A similar 3 GeV storage ring with 12 achromats and a circumference of 300 m yields an emittance of 3π nm rad. Possible applications and extensions of the QBA structure for diffraction limited storage rings are discussed.



PRESENTED:

WORKSHOP ON 4TH GENERATION LIGHT SOURCES

February 24-27, 1992

Stanford Synchrotron Radiation Laboratory
2575 Sand Hill Road, P.O. Box 4349, Bin 69
Menlo Park, California 94309-0210

A Modified QBA Optics for Low Emittance Storage Rings

D. Einfeld* and M. Plesko**

* Fachhochschule Ostfriesland, ** Sincrotrone Trieste

Abstract:

A modified quadruple bend achromat (QBA) optics as a lattice for a low emittance storage ring is presented. The novel feature of this lattice is the use of horizontally defocussing bending magnets with different bending angles to keep the radiation integrals low. A realistic storage ring with six achromats, non-dispersive straight sections of 4.6 m each and a total circumference of 124.8 m is studied. At an energy of 2.5 GeV the emittance yields only 20π nm rad. The chromaticities and the sextupole strengths are moderate, the dynamic aperture is large and the momentum acceptance is more than $\pm 9\%$ relative. A similar 3 GeV storage ring with 12 achromats and a circumference of 300 m yields an emittance of 3π nm rad. Possible applications and extensions of the QBA structure for diffraction limited storage rings are discussed.

1. Introduction

The most important factor for synchrotron radiation users is the brilliance which is mainly determined by the cross-section of the beam and given by the square root of the emittance multiplied with the betatron function.

The emittance scales in general with the square of the energy and the third power of the bending magnet's deflection angle. The optics influences the emittance via the H-function, which is determined by the shape of the horizontal betatron and dispersion functions within the dipole magnets only [1]. Low emittances can be reached if they have a minimum there. Two extreme cases are shown in figure 1.

The, theoretically, minimal emittance that can be reached with the Twiss functions given as in figure 1b is three times below the one for figure 1a [2,3,4]. Hence to reach the lowest emittance, a storage ring should have a lattice which provides a shape of the horizontal betatron and dispersion functions as represented in figure 1b in all dipole magnets. However, other design considerations forbid this. A light source includes undulators and wigglers and at the position of these insertion devices, in the long straight sections, the dispersion has to be zero. This requires a matching of the Twiss functions to the desired values within the straight sections.

The zero dispersion can be matched only in case the straight section is on the left side of the dipole in figure 1a. Two of these dipoles with a set of quadrupoles in between form the well known DBA structure [5] (see figure 2). Implicit to the DBA structure is the requirement that the phase advance of the horizontal betatron oscillation from the beginning of the first to the end of the second dipole has to be π . This is only possible if the distance between both dipoles is very large [6] or there are at least two more quadrupoles in between the dipoles, as for the ELETTRA design [7]. In most DBA designs the minimal emittance has not been attained.

Inserting a further dipole between the two DBA dipoles and providing there a shape of the Twiss functions as given in figure 1b represents a TBA structure [8]. Such an arrangement would have a lower emittance if the Twiss functions reached the optimal values both in the central and in the outer dipoles. However, it has been proved that this is not possible [4]. Even if it was possible, the ideal emittance of the TBA lattice would be smaller than the ideal DBA emittance by only a factor of 1.3 because of the relatively high contribution of the outer magnets to the total emittance (85.8%, see figure 2). Storage rings with a TBA structure actually have a three- to five-fold emittance with respect to the ideal one.

The QBA structure is obtained by inserting two dipoles between the two DBA bending magnets. Also in this arrangement the highest contribution to the emittance is given by the outer magnets (see figure 2). The investigation of a QBA structure for the 8 GeV Riken storage ring [9] has shown that this structure has no merits with respect to the DBA or TBA structures.

Quite different is the behavior of a modified QBA structure which we firstly proposed for a planned synchrotron light source LISA [10]. LISA is a 2.5 GeV electron storage ring with rather compact dimensions (i.e. a circumference of about 120 m). As mentioned above, the emittance of the TBA structure is not ideal because of the unsatisfactory matching of the Twiss functions from the straight sections to the central dipole. Matching the Twiss functions to an outer dipole with a deflection angle of $\phi/2$ should force a smaller increase in the emittance with respect to the ideal one, because the differences between the existing and the matching conditions are not as large. The matching with a dipole of an angle $\phi/2$ has been performed firstly for the storage ring DELTA [11] and outlined by Jackson [6].

The second advantage of the halved deflection angle in the outer dipole is that its contribution to the emittance is small. According to figure 2 the contribution of the outer magnets to the emittance in the ideal case is reduced to 15%. Consequently, this structure is really determined by the dipole of figure 1b, which gives the smallest emittance. Hence the ideal emittance of the modified QBA structure is smaller by a factor of 3 to 4 than that for a DBA or TBA structure.

Both advantages should result in a smaller emittance even in a realistic lattice.

2. The Lattice of the Modified QBA Structure

The lattice of our proposed modified QBA structure consists of two unit cells accompanied on each side by a matching section followed by a straight section (figure 3). The dipoles within the unit cells have a deflection angle of ϕ , whereas the ones in the matching section deflect by $\phi/2$. In order to get the desired shape of the Twiss functions in the unit cell as given by figure 1b, a bending, a focussing and a defocussing magnet are needed. This can be achieved by four quadrupoles and a dipole [11,12] or by two quadrupoles and a bending magnet with a superimposed quadrupole strength to defocus the beam horizontally (figure 4). The unit cell with a defocussing bending magnet has been chosen in our case because it has a twofold advantage:

- 1) the number of magnets per achromat is reduced;
- 2) the horizontal partition number is larger than 1 and thus reduces the emittance.

In order to obtain the minimal emittance, a strength $k_f = 2.2225 \text{ m}^{-2}$ for the 0.25m long focussing quadrupole and a k_m value of 0.3365 m^{-2} for the defocussing bending magnet have been chosen. The performance of the achromat is mainly determined by the unit cell. A hypothetical 2.5 GeV storage ring composed of 18 unit cells (20 degree bending angle each) yields an emittance of $20 \pi \text{ nm}$. The horizontal tune is determined by the k_f value of the quadrupole, while the k_m value of the bending magnet determines the vertical tune. Hence both directions are uncoupled. An advantage of the lattice is that by a twofold reduction of the chromaticity the emittance will only increase by 50%.

Altering the distance between the bending magnet and the quadrupole does not change the behavior of the cell significantly, therefore the distance between the quadrupoles and the magnet was fixed to 0.75 m in order to have enough room for the steerers and the monitors.

Four quadrupoles are required in the matching section in order to match the Twiss functions to the desired values within the straight section. By changing the strengths of the quadrupoles, which surround the straight sections one can sweep the working point over a range of ± 0.5 in both planes by keeping the emittance constant and the values of the betatron functions within the straight sections acceptable.

Since the vertical tune of one achromat is close to 0.5, some care was needed to find both the working point of the ring and the single achromat's working point far from half-integer and sextupole resonances. Several lattices with acceptable working points and chromaticities underwent further optimization studies. The positions of the chromaticity correcting sextupoles were optimized by use of the computer program CATS [13]. There are only two families of sextupoles but there is more than one member of a family in an achromat. Thus a partial cancellation of higher order terms which increase the tune shifts with amplitude and reduce the dynamic aperture was achieved. It turned out that an additional family of harmonic sextupoles in the dispersion-free region did not improve the dynamic aperture.

Finally a lattice was chosen which gave the best compromise between a large dynamic aperture and a safe working point. The layout of a 60-degree achromat with its Twiss functions is represented in figure 5. The main parameters of this QBA lattice are summarized in table 1. The working point of a single achromat is shown in figure 6. The distance from the working point to the resonances which have to be avoided is sufficient.

The emittance of the storage ring is 20π nm rad, which is about five times less than the emittances of existing rings with comparable circumferences (see reference [14] for data on light sources). With respect to the ideal minimal emittance of the modified QBA structure given in figure 2, one sees that the emittance achieved is still larger by a factor of 3.6. However, it is already below the ideal emittance of the DBA structure and below the achievable emittance of the TBA structure.

Furthermore one can also make a comparison with the machines of the 3rd generation which are under construction (ALS[15], ELETTRA[7] and PLS[16]). All these machines are able to run with an energy of 2 GeV. At this energy they have an emittance around 7 to 8π nm rad. Scaling this value to the energy of 2.5 GeV and a bending angle of 20 degrees results in an emittance in the range of 50π nm rad. That is larger by factor of two.

The emittance of the ring composed only of unit cells was 20π nm rad, too. That means that the emittance is determined mainly by the dipoles of the unit cell and not by the outer matching dipoles. Another lattice where the deflection angle of the dipoles has been changed from $10^\circ/20^\circ$ (matching dipole / unit cell dipole) to $11^\circ/19^\circ$ had an emittance of 15π nm rad - a reduction that is not negligible.

3. Dynamic Aperture

The dynamic aperture calculated for the optimized chromatic sextupole layout is shown in figure 7 for energy deviations from -9% to +9%. The tracking has been performed with one particle over 100 turns. To confirm the results four particles have been tracked over 5000 turns. The calculations were done with the computer codes RACETRACK [17] and checked with the codes CATS [12], BETA [18] and MAD [19].

For particles with the nominal energy the dynamic aperture extends from -27 mm to +27 mm (corresponding to ± 100 standard deviations of the beam size) horizontally and is flat vertically at around 30 mm (170 standard deviations at full coupling) almost over the entire region. This gives sufficient space for the injection process and for a long

beam life time. For energy deviations of $\pm 3\%$ there is no reduction of the phase space. In comparison with other 3rd generation light sources the dynamic aperture of this QBA lattice is very large.

The rather small tune shifts with the horizontal and vertical amplitude are illustrated in figure 8. The momentum dependent tune shift is seen in figure 9. According to the design of the r.f. system [10], only particles with a momentum offset of $\pm 3\%$ will be captured, therefore only this interval of momenta is important. The weak variation of the tune within this region is truly excellent.

Thus the overall dynamic properties of the proposed lattice are very promising. This is not an intrinsic property of the modified QBA lattice, however. Other lattices or less ideal sextupole arrangements gave much worse results.

4. The QBA Lattice for a High Brilliance Light Source

The 2 GeV synchrotron light sources of the 3rd generation have mostly magnets with a deflection angle between 10 and 15 degrees and the emittance is in the range from 4 to 8 π nm rad. Scaling the emittance of LISA to such bending angles results in an emittance of 1.5 π nm rad which is really an advantage. First calculations for a 1.7 GeV light source with a modified QBA lattice have been done and the Twiss functions within an achromat are given in figure 10. The main parameters are summarized in table 1 under the synonym BXS_Y. Without any optimization the emittance has a value of 1.8 π nm rad with a deflection angle of 12 degrees. A deflection angle of 10 degrees gave an emittance in the range of 1 π nm rad. The circumference of such a machine is around 200 m.

The modified QBA lattice gives for a 3 GeV machine (see figure 11) with 6°/9° deflections and a circumference of 296 m an emittance of 3 π nm rad (see table 1 - synonym ROS_Y for a list of the main parameters). The tunes of one achromat have been chosen such that they approximate the tunes of a LISA's achromat (see figure 6). First calculations of the dynamic aperture with only two chromatic sextupole families are given in figure 12, the tune shift with amplitude is shown in figure 13 and the momentum dependent tune shift is displayed in figure 14.

These results are promising. With a further optimization and by introducing a further sextupole family we hope to double the dynamic aperture while keeping the emittance constant.

5. Diffraction Limited Light Sources

The phase space of the radiation from an undulator is finite due to diffraction effects. The corresponding emittance of the light beam is given by $\epsilon_{\text{phot}} = 0.195 \lambda$, with λ being the wavelength at the peak flux. A light source is called diffraction limited if the emittance of the electron beam is smaller than that of the photon beam. The boundary for diffraction limited light sources is shown in figure 15, where we see that the BXS_Y light source with 10 degree bends is already diffraction limited if run below 2 GeV.

By halving the deflection angle of a bending magnet to 5 degrees and using five unit cells to compose an achromat which performs an overall deflection of 30 degrees, the emittance should be in the range of 0.4 π nm rad. The circumference of such a machine would be around 400 m (see the layout of such a machine - DIFL - in figure 16). By superimposing a sextupole component in the deflection magnets as well as in the quadrupoles as was proposed by Mülhaupt [20] a chromaticity compensation with a sufficient dynamic aperture should be possible and one gets a diffraction limited synchrotron light source for the X-ray region around a photon energy of 1 keV.

To emphasize the prospects of this DIFL lattice and the modified QBA lattice, their normalized emittances are compared to the ones of other light sources (taken from [21]) in figure 16.

Acknowledgement

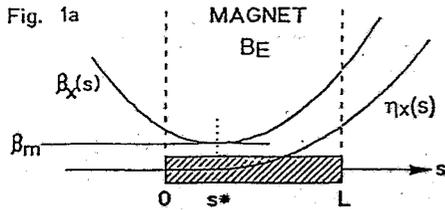
We would like to thank Dr. R. Nagaoka for kindly providing us with a copy of his sextupole optimization program CATS, for giving us all instructions concerning its use and for discussions about the results. We also thank Prof. D. Husmann from the physics institute of the University of Bonn for showing his interest in our work and for his encouragement and support.

References

- [1] M.Sands, *The Physics of Electron Storage Rings, An Introduction*, SLAC-121 UC-28 (ACC), November 1970
- [2] M.Sommer, *Optimization of the Emittance of Electron Storage Rings*, LAL/RT/83-15 (Nov. 1983)
- [3] L.C.Teng, *Minimum Emittance Lattice for Synchrotron Radiation Storage Rings*, ANL/FNAL-LS-17 (May 1985)
- [4] G.Wüstefeld, *The Minimization of the Natural Emittance in the Triple Bend Achromat*, BESSY TB 108/87, March 1987
- [5] R.Chasman and K.Green, *Preliminary Design of a Dedicated Synchrotron Radiation Facility*, IEEE Trans. Nucl. sci., NS-22, 1765 (1975)
- [6] A.Jackson, *A Comparison of Chasman-Green and Triple Bend Achromat Lattices*, Particle Accelerators, Vol 22, 111 (1987)
- [7] *ELETTRA Conceptual Design Report*, Sincrotrone Trieste, April 1989
- [8] D.Einfeld and G.Mülhaupt, *Choice of the Principle Parameters and Lattice of BESSY*, Nucl. Inst. Meth. 172 (1980)
- [9] K.Tsumaki, R.Nagaoka, H.Tanaka, K.Yoshida, M.Hara, *Lattice Comparison for the 8 GeV Synchrotron Radiation Source*, 1989 Particle Acc. Conf., Chicago
K.Tsumaki, R.Nagaoka, H.Tanaka, M.Hara, *Design of a Quadruple Bend Achromat Lattice*, Riken Accel. Rep. 23 (1989)
- [10] *Vorschlag für den Bau eines Speicherringes zur industriellen Nutzung der Synchrotron-Strahlung im Raum Bonn*, Universität Bonn, October 1991
- [11] *DELTA Status Report*, 1990, University of Dortmund
DELTA, a Low Emittance Storage Ring as a Free-Electron-Laser Radiation Source, Proc. 1989 IEEE PAC (1989), p.780; Part. Accel. Vol. 33 (1990), p.27
- [12] D.Schirmer, *DELTA Optics*, Diploma Thesis, University of Dortmund (1989) unpublished
- [13] R.Nagaoka, *CATS - A Computer Code for the Optimization of Sextupoles and Linear Optics in Circular Accelerators*, Sincrotrone Trieste, ST/M-91/3, February 1991
- [14] J.Murphy, *Synchrotron Light Source Data Book*, BNL 4233, Brookhaven National Laboratory
- [15] *1-2 GeV Synchrotron Radiation Source, Conceptual Design Report*, July 1986, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California Berkeley, CA 94720
- [16] *Pohang Light Source, Conceptual Design Report*, Pohang Institute of Science and Technology, P.O. Box 125, Pohang, Republic of Korea
- [17] F.Iazzourene, C.J.Bocchetta, R.Nagaoka, L.Tosi, A.Wrulich, *RACETRACK User's Guide*, Sincrotrone Trieste, ST/M-91/11, July 1991
- [18] L.Farvacque, A.Roport, *BETA User's Guide*, ESRF-SR/LAT 88-08
- [19] U.Grote, F.C.Iselin, *MAD, User's Reference Manual*, CERN/SL/90-13 (AP)
- [20] G.Mülhaupt, W.D.Klotz, *Another Lattice Model for High Brightness Synchrotron Radiation Sources*, ESRF-LAT-88-07.
- [21] A.Wrulich, *Overview of 3rd Generation Light Sources*, these proceedings.

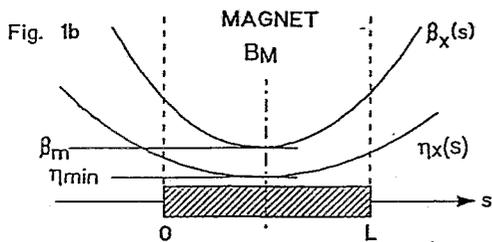
STORAGE RING PARAMETERS

	Project LISA	Project BXSX	Project ROSY
Achromatic structure	QBA	QBA	QBA
Normal energy (GeV)	2.5	1.7	3
Superperiod	6	10	12
Circumference (m)	124.8	189.6	292.8
Mean radius (m)	19.86	30.176	46.6
Max. current (mA)	150	300	300
R.F. Frequency (MHz)	500	500	500
Harmonic number	208	316	488
Quantum lifetime (h)	10	10	10
Natural emittance (π nm rad)	20	1.8	3
Natural energy spread (%)	0.1	0.0075	0.1
Betatron tunes Q_x/Q_y	10.416/3.558	18.18/5.24	21.90/14.80
Natural chromaticities ξ_x/ξ_y	-21.24/-9.80	-42.23/-21.55	-51/-30
Momentum compaction factor	$0.56 \cdot 10^{-2}$	$0.86 \cdot 10^{-3}$	$0.75 \cdot 10^{-3}$
Beta functions			
Horizontal (max/min)	11.91/0.41	10.55/0.32	13.3/0.3
Vertical (max/min)	17.17/2.18	25.35/1.32	12.1/0.6
Straight section (max/min)	8.11/2.18	10.55/6.81	7.18/2.29
Maximum dispersion (m)	0.466	0.200	0.18
Number of dipole magnets (5/10)	12/12	20/20	24/24
Dipole length (m) (5/10)	0.9774/1.9548	0.44/0.880	0.84/1.62
Bending radius (m)	5.60	4.20	8.00
Bending field (T)	1.50	1.35	1.25
Gradient (T/m) / field index	2.819/10.52	5.273/16.40	7.5/48.00
Number of quadrupoles	12/60=70	20/80/20=120	18/96/24=168
Length of quadrupoles (m)	0.4/0.25	0.25/0.32/0.5	0.25/0.40/0.6
Quadrupole families	5	5	6
Gradient (T/m) / strength (m^{-2})	23	23	17
Number of sextupoles	54	110	132
Length of sextupoles (m)	0.1	0.15	0.2
Sextupole families	2	3	3
Sextupol parameter, $S=B/R^2(T/m^2)$	750	750	750



$$S^* = 3L/8, \quad \beta_m = \sqrt{\frac{3}{320}} \cdot L$$

$$E_{x0} = Cq \cdot \gamma_0^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \varphi^3 \cdot \frac{1}{4\sqrt{12}}$$



$$\beta_m = \frac{1}{2\sqrt{15}} \cdot L, \quad \eta_{min} = \frac{1}{24\rho} \cdot L^2$$

$$E_{x0} = Cq \cdot \gamma_0^2 \cdot \frac{1}{J_x} \cdot \varphi^3 \cdot \frac{1}{3.4\sqrt{12}}$$

Fig. 1 Twiss functions in a bending magnet which minimize the H-function for a nondispersive entrance (a) and in the general case (b). The expressions for the optimal values of the Twiss function and the minimal emittances are shown.

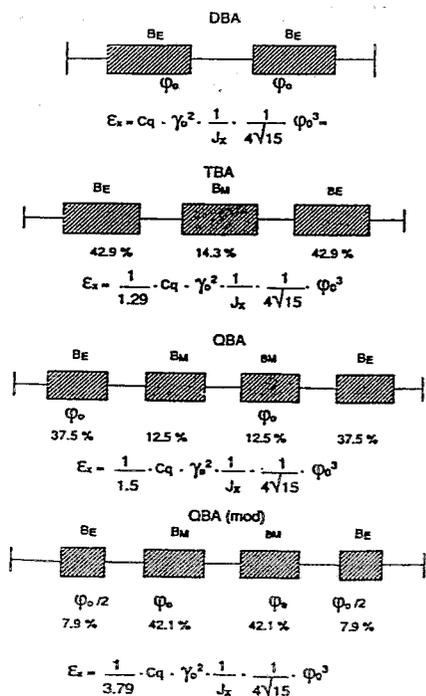


Fig. 2 A comparison of theoretical minimal emittances obtained by different bending magnet structures. The percentages under the magnets indicate their relative contributions to the H-function average.

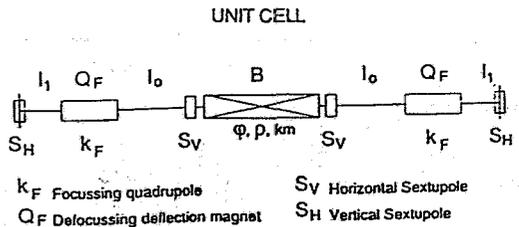


Fig. 3 The unit cell of the modified QBA lattice.

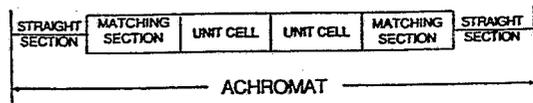


Fig. 4 A QBA achromat's inner structure.

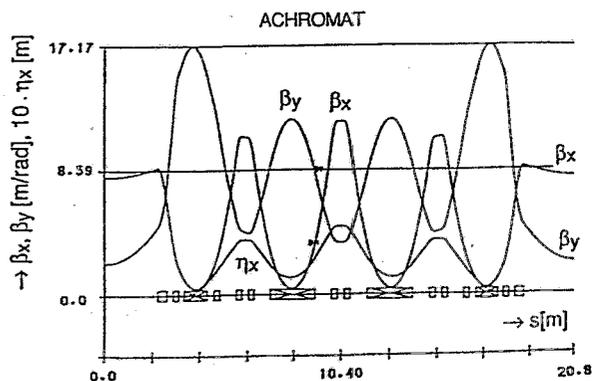


Fig. 5 The Twiss functions and the lattice of the proposed LISA storage ring.

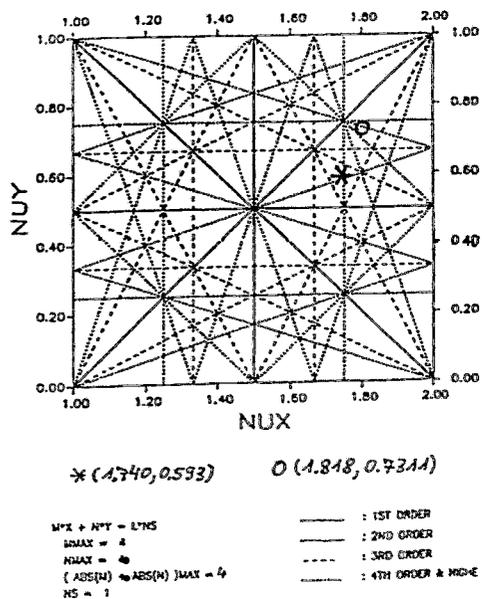


Fig. 6 The single achromat tune diagrams of LISA (star) and of ROSY (circle).

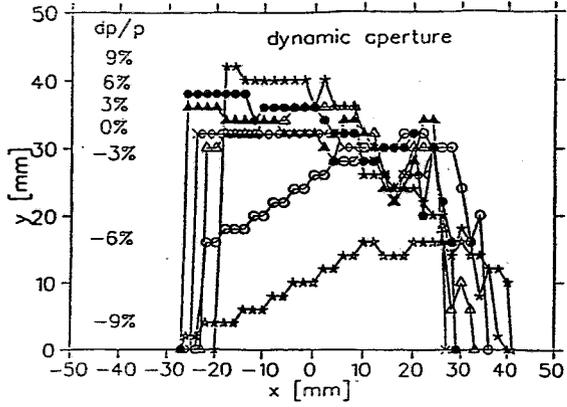


Fig. 7 The dynamic aperture of LISA for deviations -9% to +9%.

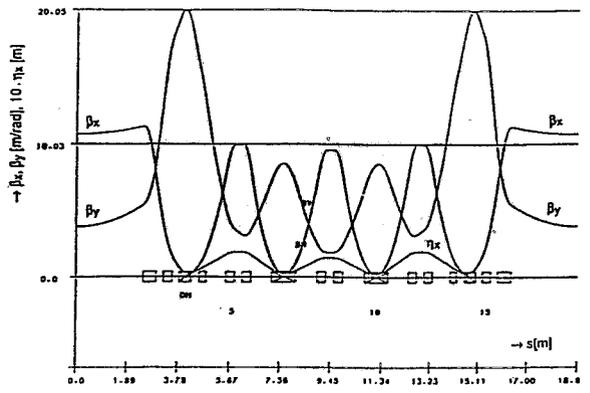


Fig. 10 The lattice for a 1.7 GeV, 1.8 nm rad emittance light source (BXS).

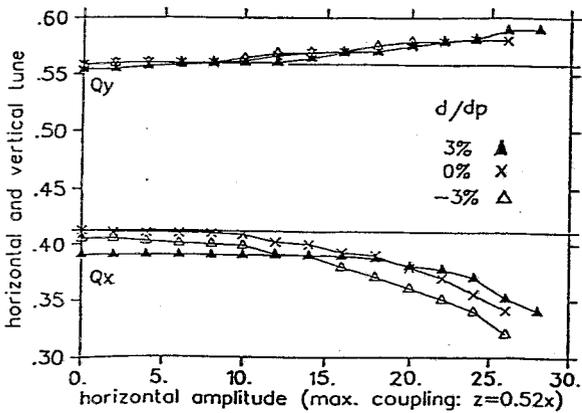


Fig. 8 The fractional tune of LISA as a function of the initial particle amplitude for on-energy particles (crosses), and $dp/p = -3\%$ (open triangles), and $+3\%$ (full triangles), respectively.

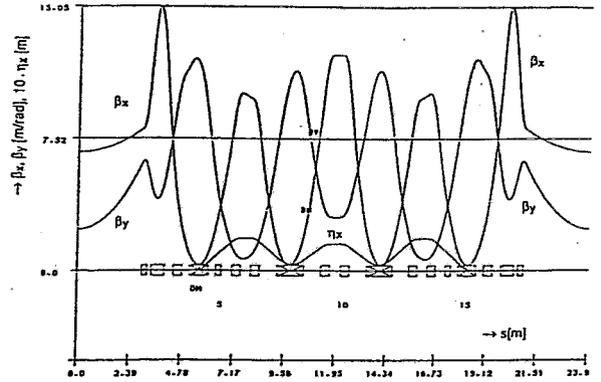


Fig. 11 The lattice of a 3 GeV, 1 nm rad emittance light source (ROSY). The positions of the chromatic sextupoles are indicated with vertical bars.

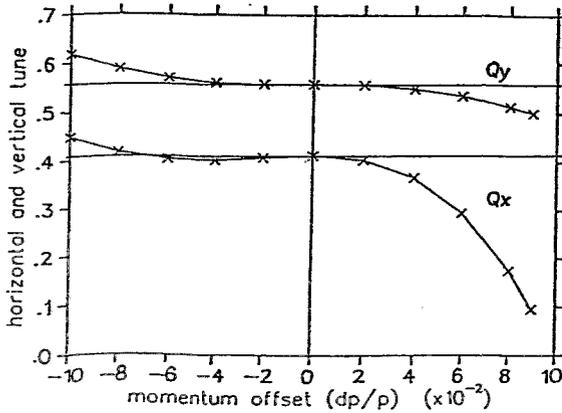


Fig. 9 The fractional tune of LISA as a function of particle energy deviation.

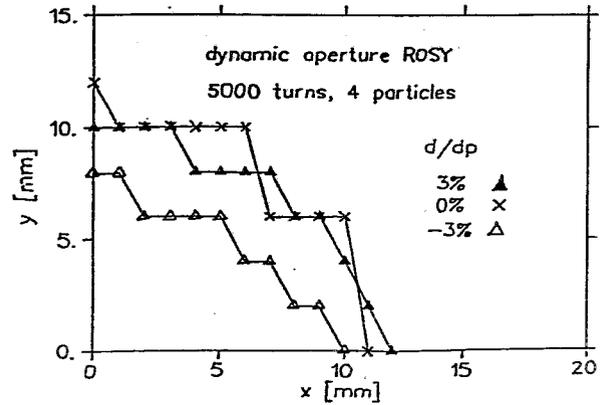


Fig. 12 The dynamic aperture of ROSY with optimized chromatic sextupoles.

3 GeV Diffraction Limited Light Source (DIFL)

Circumference = 440 m, Emittance = 0.4 nmrاد

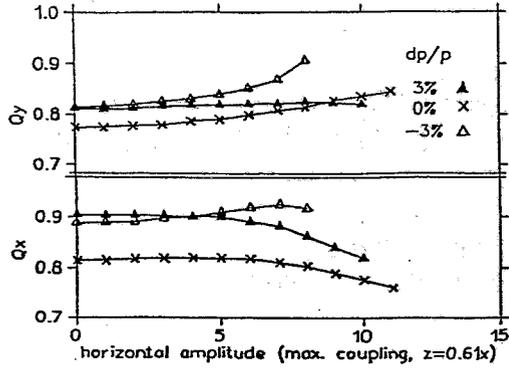


Fig. 13 The fractional tune of ROSY as a function of the initial particle amplitude for on energy particles (crosses), and $dp/p = -3\%$ (open triangles), and $+3\%$ (full triangles), respectively.

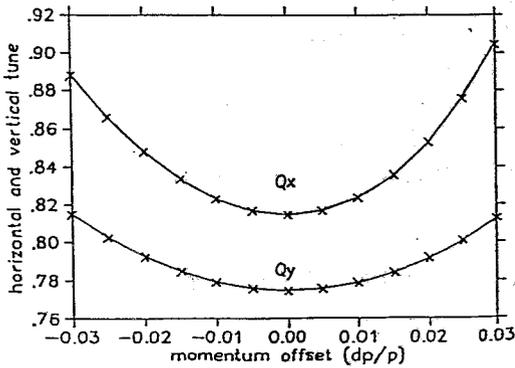
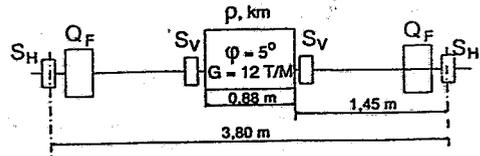
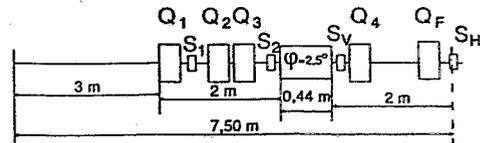


Fig. 14 The fractional tune of ROSY as a function of particle energy deviation.

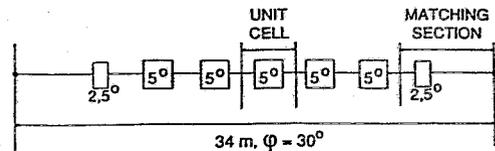
UNIT CELL:



MATCHING SECTION:



ACHROMAT:



$C = 440 \text{ m}, \mathcal{E}_X \approx 0.4 \text{ nmrاد}$

Fig. 16 A possible layout for a multiple bend achromat diffraction limited light source.

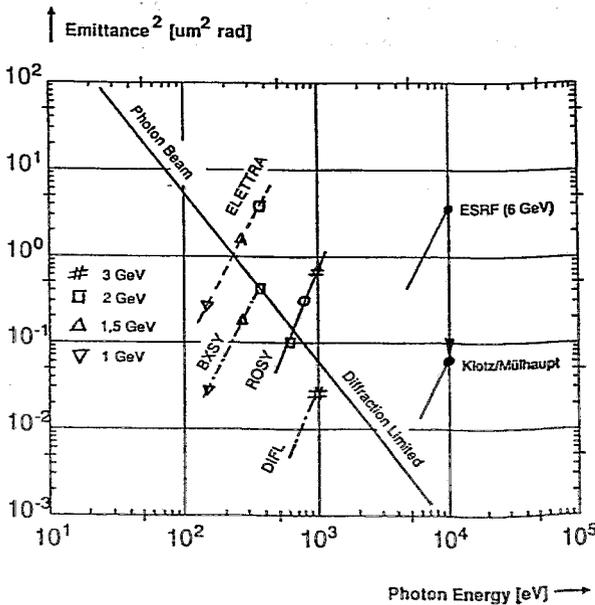
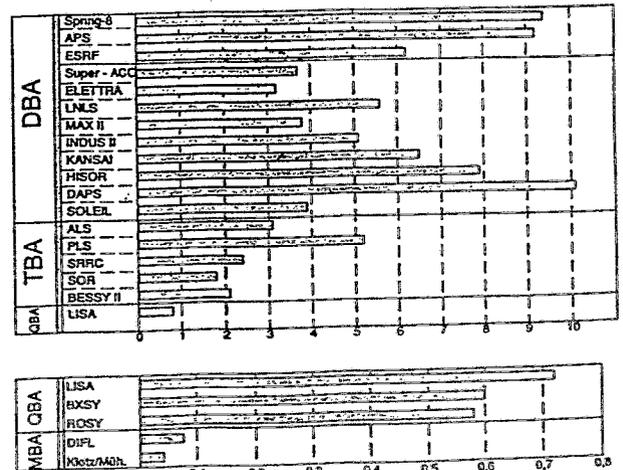


Fig. 15 Undulator peak photon energy versus beam emittance for various light sources. The natural photon beam emittance due to diffraction is indicated.



Normalized emittance \mathcal{E}_N in $[\mu\text{m N c}^3/\text{GeV}^2]$

Fig. 17 The normalized emittance \mathcal{E}_N for various 3rd generation lattices are compared to the lattices proposed in this paper.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle-I- Wissenschaftliches Programm, Forschungszentrum Rossendorf e. V. April 1992
- [2] R. Chasman and K. Green, Preliminary Design of a Dedicated Synchrotron Radiation Facility, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-22, 1765 (1975)
- Proposal for a National Synchrotron Light Source, Brookhaven National Laboratory, BNL 50595, October 1977
- S. Krinsky et al., Design Status of the NSLS XRAY Storage Ring, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-26, 3806 (1979)
- [3] D. Einfeld and G. Mülhaupt, Choice of the Principle Parameters and Lattice of BESSY, Nucl. Instr. and Meth. 172 (180)
- [4] R. Maier, High Brilliance Lattices, CERN 89-01, 89 (1989)
- A. Ropert, High Brilliance Lattices and the Effects of Insertion Devices, CERN 90-03, 158 (1990)
- A. Jackson, A Comparison of Chasman-Green and Triple Bend Achromat Lattices, Particle Accelerators, Vol. ZZ, 111 (1987)
- [5] D. Einfeld und R. Fink, Synchrotronstrahlung: zukünftige Quellen und ihre Anwendung, Primärbericht 13/03/01P361, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Oktober 1991
- [6] K. Tsumaki, R. Nagaoka, H. Tanaka, K. Yoshida and M. Hara, Lattice Comparison for the 8 GeV Synchrotron Radiation Source, 1989 Particle Acc. Conf. Chicago, March 20-23

- [7] G. Mülhaupt, Hardware Limitations on Storage Ring Sources, CERN 90-03,98 (1990)
- G. Mülhaupt and W. D. Klotz, Another Lattice Model for High Brightness Synchrotron Radiation Sources, ESRF-LAT-88-07
- [8] Workshop on 4th GENERATION LIGHT SOURCES, February 24-27, 1992, Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, Stanford, USA
- [9] D. Einfeld and M. Plesko, "A modified QBA Optics for Low Emittance Storage Rings", Workshop on the 4th Generation Sources, Feb 24-27, 1992, SSRL/SLAC, Stanford USA
- [10] Delta Status Report 1990, University Dortmund
- DELTA, a Low Emittance Storage Ring as Free-Electron-Laser Radiation Source, Proc. 1989 IEEE PAC, Vol 2 of 3 (1989) 780, Part. Accel. (1990) Vol. 33, p.27
- [11] D. Schirmer, DELTA Optics, Diploma Thesis, University of Dortmund (1989) unpublished
- [12] LISA, Vorschlag für den Bau eines Speicherringes zur industriellen Nutzung der Synchrotronstrahlung im Raum Bonn, Universität Bonn, Oktober 1991
- [13] 1-2 GeV Synchrotron Radiation Source, Conceptional Design Report, July 1986, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California Berkeley, California 94720
- [14] ELETTRA, Conceptional Design Report, Sincrotrone Trieste, Pariciano 99 - I 34012 Trieste - Italy
- [15] ESRF-Foundation Phase Report, February 1987, European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble
- [16] Design Report for the MAX II Ring, MAX-lab, University of Lund

- [17] Pohang Light Source, Conceptional Light Source, Pohang Institute of Science and Technology, P. O. Box 125, Pohang, Republic of Korea
- [18] M. Cornacchia and K. Halbach, Study of Modified Sextupoles for Dynamic-Aperture Improvement in Synchrotron Radiation Sources, Nuclear Instruments and Methods, A 290 (1990) 19-33
- [19] SLM, Vorschlag für den Bau einer Synchrotronlichtquelle in Mainz, IMM Institut für Mikromechanik GmbH, Mainz, Juni 1991
- [20] Vorschlag für eine dedizierte Synchrotronlichtquelle für die Mikrostrukturtechnik am Kernforschungszentrum Karlsruhe, Kernforschungszentrum Karlsruhe, November 1991
- [21] A. Wrulich, RACETRACK, DESY 84-06-(1984)
- [22] L. Farvaque, A. Ropert, BETA User's Guide, ESRF-SR/LAT 88-08
- [23] HELIOS, Kompaktspeicherring für IBM, gebaut von Oxford Instruments
- [24] 1.4 GeV Speicherring in Baton Rouge, gebaut von Maxwell Brobeck
- [25] G. Stange, Fachhochschule Kiel
- [26] BESSY II, Eine optimierte Undulator/Wiggler-Speicherring-Lichtquelle für den VUV- und XUV-Spektralbereich (1. Teil), Berlin, November 1986
- [27] A. Wrulich, Überblick zu den Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation. (Siehe [8])
- [28] P. Elleaume, Theory of Undulators and Wigglers, CERN 90-03, 142 (1990)
- [29] J. Schwinger, On the Classical Radiation of Accelerated Electrons, Phys. Rev. 75, 1912 (1949)

- [30] A. A. Sokolov und I. M. Ternov, Synchrotron Radiation, Akademie Verlag Berlin, 1966
- [31] G. K. Green, Spectra and Optics of Synchrotron Radiation, Brookhaven National Laboratory, BNL 50522
- [32] S. Krinsky, M. L. Perlman and R. E. Watson, Characteristics of Synchrotron Radiation and of its Sources, Handbook on Synchrotron Radiation, Vol. 1, North-Holland Publishing Company, 1983
- [33] V. P. Suller, Comparative Synchrotron Radiation Spectra, Daresbury Laboratory DL/TM 118, 1973
- [34] P. Elleaume, Theory of Undulators and Wigglers, CERN 90-03, S. 142
- [35] Kim, Kwang-Je, Characteristics of Synchrotron Radiation, Conference Proceedings 184, American Institut of Physics, New York 1989
- [36] Symbole, Einheiten und Nomenklatur in der Physik, Dokument V.I.P. 20 (1978), Deutsche Ausgabe, Physik Verlag, Weinheim, 1980
- [37] X-RAY DATA BOOKLET, Lawrence Berkeley Laboratory, California, USA, April 1986

An dieser Studie haben mitgewirkt:

Büttig, Hartmann	HF-System	FZR
Breyer, Ingolf	Optikrechnungen	FHO
Einfeld, Dieter	Optik, Magnete	FHO
Fischer, Jens	CAD/Zeichnungen	FHO
Gedenk, Gundolf	CAD/Zeichnungen	FHO
Gersch, H. U.	Magnete	FZR
Gläser, Werner	Netzgeräte	FZR
Guratzsch, Hartmut	Koordinierung	FZR
Hartmann, H.	Kontrollsystem	FZR
Janssen, Dietmar	Optikrechnungen	FZR
Linnemann, Wolf-J.	Kontrollsystem	FZR
Plesko, Mark	Optikrechnungen	ST
Richter, Rudolf	Netzgeräte	ST
Stange, Gerd	Linearbeschleuniger	FH Kiel
Thimm, Regina	Textverarbeitung	FHO
Walker, Richard	Undulatoren/Wiggler	ST

FHO: Fachhochschule Ostfriesland
FZR: Forschungszentrum Rossendorf e.V.
FH Kiel: Fachhochschule Kiel
ST: Sincrotrone Trieste

Für die Durchsicht des Manuskriptes und für viele Hinweise möchten wir uns bei Herrn Prof. Dr. Niels Marquardt sehr herzlich bedanken.