

# **ROSY**

## **Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle**

**Projektvorschlag 2. Fassung  
Stand November 1993**

**Teil I: Wissenschaftliche Begründung  
Teil II: Maschinenkonzept und Technisches Projekt**

**verantwortliche Bearbeiter: D. Einfeld und W. Matz**

## *Zusammenfassung*

Der Projektvorschlag für eine kompakte Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation ROSY wird beschrieben. Die Quelle soll für die Materialforschung dediziert sein, die für die Forschung im regionalen Umfeld von Rossendorf prägend ist.

Bei einer Speicherringenergie von 3 GeV wird Synchrotronstrahlung im harten Röntgenbereich mit einer kritischen Energie des Spektrums von  $E_c = 8,4$  keV ( $\lambda_c = 0,14$  nm) emittiert. Mit einer natürlichen Emittanz von  $28 \pi$  nm rad wird eine sehr brillante Strahlung zur Verfügung gestellt. Neben der Strahlung aus Ablenkmagneten kann Strahlung aus Wiggler und Undulatoren genutzt werden. Für diese insertion devices sind 8 Einbaumöglichkeiten vorhanden, von denen 4 in nichtdispersionsfreien geraden Strecken liegen. Der Speicherring hat eine vierfache Symmetrie, einen Umfang von 148 m und ist als modifizierte FODO-Struktur konzipiert. Ein nachträglicher Einbau von supraleitenden Ablenkmagneten zur Erzeugung eines härteren Spektrums und damit zur Ausweitung des Anwendungsbereiches ist möglich.

Der Teil I enthält die wissenschaftliche Begründung für ROSY und eine Darstellung der Nutzungsmöglichkeiten. Im Teil II werden das Speicherringkonzept und die technischen Details der einzelnen Komponenten beschrieben.

## *Abstract*

The paper describes the proposal for a 3rd generation synchrotron radiation source ROSY. This source is designed as a dedicated one for the use in materials research, which is one of the main research fields in the region around Rossendorf.

The electron energy of the storage ring will be 3 GeV and the emitted synchrotron radiation is in the hard X-ray region with a critical energy of the spectrum of  $E_c = 8,4$  keV ( $\lambda_c = 0,14$  nm). With a natural emittance of  $28 \pi$  nm rad ROSY emits high brilliance radiation. Besides the radiation from bending magnets there will be the possibility for using radiation from wigglers and undulators. For the insertion devices 8 places are foreseen four of which are located in non-dispersion-free regions. The storage ring is of fourfold symmetry, has a circumference of 148 m and is designed in a modified FODO structure. An upgrade of ROSY with superconducting bending magnets in order to shift the spectrum to higher energy can easily be done.

Part I contains the scientific case and a description of the planned use of the beam lines. Part II describes the design of the storage ring and its components in more detail.

## **Inhaltsverzeichnis**

### **Vorbemerkung**

### **Teil I: Wissenschaftliche Begründung**

1	Wissenschaftliche Begründung	I-1
1.1	Einleitung	I-1
1.2	Synchrotronstrahlungsquellen	I-2
1.3	Wissenschaftliche Felder für eine Synchrotronstrahlungsquelle in Rossendorf	I-4
1.4	Forderungen an eine Synchrotronstrahlungsquelle ROSY	I-10
1.5	Stellung von ROSY im nationalen Rahmen	I-12
2	Das technische Konzept von ROSY	I-14
3	Anforderungen an die Instrumentierung von ROSY	I-25
4	Der Standort Rossendorf	I-29
	Referenzen zu Teil I	I-34

Anhänge:	I.A Übersicht über Synchrotronstrahlungsquellen in der Welt	
	I.B Synchrotronstrahlung und Materialwissenschaft	
	I.C Potentielle Nutzungsinteressen an einer Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung in Rossendorf durch Forschungseinrichtungen der Region	
	I.D Technische Standortbeschreibung für Rossendorf	

### **Teil II: Maschinenkonzept und Technisches Projekt**

1	Allgemeines	II-1
2	Magnetstruktur	II-4
3	Berechnung der Strahllebensdauer	II-62
4	Einfluß von Wigglern und Undulatoren auf die Strahlparameter des Speicherringes ROSY	II-67
5	Injektion	II-74
6	Magnete	II-83
7	Hochfrequenzsystem	II-117
8	Netzgeräte und Energieversorgung	II-131
9	Vakuumsystem ROSY	II-148
10	Der Injektor	II-165
11	Strahldiagnose und Instrumentierung	II-183
12	Kontrollsystem	II-188
13	Gebäude	II-215
	Referenzen zu Teil II	II-229

- Anhänge
- II.A: Eingabedaten und Lösungen für die Optiken ROSY A, ROSY B und ROSY C
  - II.B: Eingabedaten für die Optiken ROSY A, ROSY B und ROSY C für das Programm RACETRACK
  - II.C: Eingabedaten der Optik ROSY A, inklusive der Multipolfehler bis  $n=10$ , für das Programm BETA und Ergebnis der dynamischen Apertur
  - II.D: Eingabedaten der Optik mit supraleitenden Magneten für das Programm RACETRACK

## Mitarbeiter und Danksagungen



## Vorbemerkung

Das Forschungszentrum Rossendorf e.V. hat nach seiner Gründung zum 1.1.1992 begonnen, verschiedene Projekte zur längerfristigen wissenschaftlichen Profilierung auszuarbeiten. Es handelt sich dabei um die Errichtung des ersten auch klinisch nutzbaren PET-Zentrums in den Neuen Bundesländern (Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie), um den Aufbau eines Komplexes von Ionenstrahltechniken auf der Basis langjähriger Erfahrungen in der Ionenstrahlphysik (Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung) und um das Projekt einer für die Materialforschung dedizierten Synchrotronstrahlungsquelle. Allen diesen Projekten liegt die Idee zugrunde, daß das Forschungszentrum Rossendorf sein Profil durch die Anwendung von Strahlungstechniken in den Bereichen Materialforschung sowie Biomedizin-Chemie finden soll. Die genannten 3 Projekte ergaben sich unmittelbar aus den Empfehlungen des Wissenschaftsrates zum ehemaligen ZfK Rossendorf vom Juli 1991 bzw. wurden vom Gründungskomitee des FZR in der abschließenden Sitzung als Aufgaben formuliert.

Das Forschungszentrum Rossendorf hat daraufhin den Zuwendungsgebern, vertreten durch das Sächsische Ministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) und das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), am 18. Juni 1992 einen Projekt-"Vorschlag für die Errichtung einer Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung im Forschungszentrum Rossendorf" [RO 92] übermittelt.

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Ergebnisse der Arbeit an dem Projektvorschlag im Laufe des letzten Jahres und baut insofern auf dem vorjährigen Bericht auf. Er modifiziert gewisse Aussagen des ersten Vorschlages, dokumentiert aber vor allen Dingen detailliertere Vorstellungen sowohl zum Maschinenkonzept als auch zur wissenschaftlichen Nutzung einer zukünftigen Synchrotronstrahlungsquelle ROSY. Wesentlich für den Fortschritt in der Projektarbeit war dabei die Unterstützung vieler Fachkollegen in Beschleunigerlaboratorien im In- und Ausland sowie von Gruppen interessierter zukünftiger Nutzer. Im Bereich des Maschinenentwurfs nahmen eine Reihe der nun vorliegenden Vorstellungen durch gemeinsame Studien mit auswärtigen Kollegen oder durch den Erfahrungsaustausch in anderen Instituten ihre jetzige Form an. Im Bereich der Nutzungsanforderungen an eine solchen Quelle waren ein Arbeitstreffen mit potentiellen Nutzern Mitte Dezember 1992 [Nu 92] und die nachfolgende Erhebung der Einzelanforderungen nützliche Schritte. Das FZR wurde von zwei international zusammengesetzten Beratungskomitees für die Nutzung der Synchrotronstrahlungsquelle (unter Leitung von Prof. R. Haensel) und für die Auslegung des Speicherringkomplexes (unter Leitung von Prof. G. Mülhaupt) ganz wesentlich unterstützt.

## *Referenzen*

- [Ro92] ROSY - Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle, Vorschlag für die Errichtung einer Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung, verantwortliche Bearbeiter: W. Matz, D. Einfeld, FZR 92-10, Rossendorf, Juni 1992
- [Nu 92] Arbeitstreffen "Nutzung einer zukünftigen Synchrotronstrahlungsquelle", Sammlung der Beiträge, Hrsg. W. Matz, FZR 93-03, Rossendorf, Januar 1993

# 1 Wissenschaftliche Begründung

## 1.1 Einleitung

Die Vorgängereinrichtung des Forschungszentrums Rossendorf, das ZfK Rossendorf, hatte in der Vergangenheit die Aufgabe, neben der Durchführung eigener Forschungsprogramme große Forschungsgeräte wie Reaktor, Zyklotron, elektrostatische Beschleuniger und weitere Einrichtungen auch anderen Instituten im Sinne eines Benutzer-Labors zur Verfügung zu stellen.

In der Anlage seines Programms ist das Forschungszentrum Rossendorf (FZR) auch für die Zukunft darauf orientiert, nicht nur anwendungsorientierte Grundlagenforschung von überregionaler Bedeutung durchzuführen, sondern auch im Bereich mittelgroßer Forschungsgeräte eine Benutzer-Labor-Funktion zu erfüllen.

Mit der Neugründung des FZR wurde auch die Erneuerung der Anlagen auf die Tagesordnung gesetzt, wobei im speziellen Fall der Institute in Ostdeutschland eine allgemeine Anpassung des Ausstattungsniveaus an den internationalen Standard voranzutreiben ist.

Bei der Bestimmung der längerfristigen Perspektiven des FZR und damit auch bei der Entscheidung über den Bau von mittelgroßen Forschungsgeräten spielt dann das wissenschaftliche Umfeld, d. h. die Interessengebiete der potentiellen auswärtigen Nutzer, eine wesentliche Rolle. Gleichzeitig muß es sich natürlich um eine grundlegende und zukunftssträchtige Forschungsmethode handeln, die in solch einem Gerät ihre Basis hat und die auch für die Ausbildung an Hochschulen bedeutsam ist. Dabei ist der Aspekt einer möglichst breiten, fächerübergreifenden Nutzerschaft wesentlich. Schließlich sollte ein längerfristiges Potential des industriellen Interesses entweder direkt durch eigene Forschung und spätere punktuelle technologische Anwendungen oder doch zumindestens indirekt über die Ausbildung vorhanden sein.

Synchrotronstrahlung hat sich in den etwa 25 Jahren ihrer Nutzung zu einem unerläßlichen Hilfsmittel für die Forschung in Physik, Chemie, Biologie, Werkstoffwissenschaft und inzwischen auch der Medizin entwickelt. Mit der Entwicklung der Mikrostrukturtechnik ist auch punktuell ein unmittelbarer Einsatz der Synchrotronstrahlung in technologischen Prozessen realisiert worden.

Neben grundlegenden Effekten werden mit Synchrotronstrahlung immer mehr Detailprobleme der Struktur und der Eigenschaften von technologisch relevanten Stoffen untersucht, so daß die Materialwissenschaft im weitesten Sinne einen zunehmenden Anteil der Experimente ausmacht. Es ist heute noch nicht abzusehen, daß das Entwicklungspotential von Synchrotronstrahlungsmethoden ausgeschöpft ist, und insofern handelt es sich um eine sehr zukunftssträchtige Technik.

Von diesen Überlegungen ausgehend schlägt das Forschungszentrum Rossendorf die Errichtung einer dedizierten Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung, ROSY, vor.

## 1.2 Synchrotronstrahlungsquellen

Von ihrer Entwicklung teilt man die Synchrotronstrahlungsquellen in mehrere Generationen ein. Zur ersten Generation gehören Beschleunigeranlagen, die ursprünglich für Kern- und Teilchenphysik errichtet wurden und nur eine parasitäre Nutzung der Synchrotronstrahlung erlaubten. Die zweite Generation sind Speicherringe, die schon gezielt für Synchrotronstrahlungsnutzung konzipiert wurden, wobei die Mehrzahl der Strahlrohre aus den Ablenkmagneten ausgeführt wird. Diese Quellen sind noch durch größere Werte der Emittanz (Strahldivergenz) gekennzeichnet. Die jetzt im Aufbau bzw. in der Inbetriebnahme befindliche 3. Generation von Quellen zeichnet sich dadurch aus, daß sie Emittanzen unter  $40 \pi \text{ nm rad}$  realisiert wodurch eine hochbrillante Strahlung erzeugt wird. Das zweite wesentliche Merkmal sind gerade Abschnitte im Speicherring zur Aufnahme von Wigglern und Undulatoren. Diese Einbauten erhöhen die Brillanz des nutzbaren Strahles noch weiter. Eine Übersicht über existente und geplante Synchrotronstrahlungsquellen in der Welt zum Stand von 1991 ist in Anlage A enthalten.

Von dem Wellenlängen- oder Energiebereich der erzeugten Synchrotronstrahlung teilt man die Quellen in 2 wesentliche Gruppen ein

- a) Quellen für den "Vakuum-Ultraviolett" und "weichen" Röntgenbereich (VUV/XUV)
- b) Quellen für den Bereich der "harten" Röntgenstrahlung

Je nach der wissenschaftlichen Fragestellung wird die eine oder die andere Art von Quelle bevorzugt. Untersuchungen der elektronischen Struktur der Proben mit spektroskopischen Methoden oder Röntgenmikroskopie werden vorzugsweise an VUV/XUV-Quellen durchgeführt. Will man dagegen vor allem Auskünfte über die geometrische Struktur auf atomarer Ebene, so sind kurze Wellenlängen und damit Quellen im Röntgenbereich gefordert.

Die Nutzung ist auf Quellen beider Spektralbereiche etwa gleichverteilt. In der National Synchrotron Light Source am BNL (USA) sind deshalb beispielsweise 2 Ringe zur Abdeckung beider Spektralbereiche nebeneinander installiert. In den USA werden gegenwärtig auch 2 neue Projekte für jeden der beiden Bereiche, nämlich die Advanced Light Source (ALS) in Berkeley und die Advanced Photon Source (APS) in Argonne realisiert.

In Europa wurde mit der jetzt in Betrieb gegangenen ESRF in Grenoble die erste Hochbrillanz-Synchrotronstrahlungsquelle im harten Röntgenbereich als internationales Projekt verwirklicht. Für den XUV/VUV-Spektralbereich sind mehrere nationale Quellen im Bau. Dazu gehören ELETTRA (Trieste), MAX II (Lund) und BESSY II (Berlin). Daneben gibt es eine Reihe von weiteren Projekten für Synchrotronstrahlungsquellen. In Tabelle 1.1 sind ausgewählte Synchrotronstrahlungsquellen in Deutschland und Europa zusammengestellt. Die bereits im Bau befindlichen Quellen und die ESRF decken den wachsenden Bedarf an Synchrotronstrahlung offenbar nicht ab, so daß weitere nationale Projekte ausgearbeitet werden. Dabei ist im wesentlichen die

Tendenz zu Maschinen geringer Emittanz (und damit hoher Brillanz) festzustellen\*.

Tabelle 1.1: Ausgewählte Synchrotronstrahlungsquellen der 2. und der 3. Generation in der Bundesrepublik Deutschland und Europa

Status	Ring	E	R	$\epsilon_x$	$\epsilon_n$	$E_c$	$\lambda_c$	Standort
		GeV	m	nmrad	$\frac{\text{nmrad}}{(\text{GeV})^2}$	keV	nm	
a.	BESSY I	0,8	1,78	40,0	62,5	0,64	1,90	Berlin
a.	ELSA	3,5	10,8	900,0	73,5	8,23	0,15	Bonn
a.	DORIS	4,5	12,1	405,0	20,0	16,7	0,074	Hamburg
b.	DELTA	1,5	3,30	9,9	4,4	2,27	0,55	Dortmund
b.	MAX II	1,5	3,33	8,6	3,8	2,24	0,55	Lund
b.	BESSY II	1,7	4,36	6,0	2,08	2,5	0,50	Berlin
b.	ELETTRA	2,0	5,50	7,2	1,8	3,22	0,38	Triest
b.	ESRF	6,0	25,0	6,2	0,17	19,2	0,065	Grenoble
c.	SLS	2,1	2,19	1,5	0,34	3,5	0,35	Villigen
c.	SOLEIL	2,15	4,48	37,0	8,0	4,9	0,27	Orsay
c.	KfK-Quelle	2,4	4,90	700,0	121,0	6,3	0,20	Karlsruhe
c.	LISA	2,5	5,60	20,0	3,2	6,2	0,20	Bonn
c.	SLM	2,5	5,56	300,0	48,0	6,2	0,20	Mainz
c.	DIAMOND	3,0	7,64	30,0	3,33	7,8	0,16	Daresbury
c.	ROSY	3,0	7,15	28,6	3,1	8,4	0,14	Dresden

Erklärungen der Abkürzungen: a: in Betrieb, b: im Bau, c: in der Planung,  
 E: Elektronenenergie, R: Ablenkradius,  $\epsilon_x$ : Emittanz,  $\epsilon_n$ : auf 1 GeV normierte Emittanz,  $\lambda_c$ : kritische Wellenlänge,  $E_c$ : kritische Photonenenergie

Es handelt sich generell um Speicherringe der 3. Generation, die auf einen Einsatz von Wiggler und Undulatoren für die Strahlungserzeugung optimiert sind. Durch diese Orientierung wird einerseits die verfügbare Brillanz noch weiter erhöht, andererseits aber die Anzahl der Strahlrohre geringer als bei Speicherringen, deren Strahlrohre im wesentlichen aus Ablenkmagneten ausgeführt werden. In der Konsequenz heißt das aber auch, daß der Zugang zu existierenden modernen Synchrotronstrahlungsquellen bei einer wachsenden Zahl von interessierten Anwendern erschwert werden wird, woraus ein Teil der Nachfrage nach weiteren Quellen entsteht.

\* Eine Ausnahme zu Letztgenanntem bilden die KfK-Quelle und die SLM, Mainz mit vergleichsweise hoher Emittanz. Das Nutzungskonzept dieser Maschinen hat seinen Schwerpunkt in der Mikrostrukturtechnik und dort ist die geringe Emittanz nicht gefordert.

Die neuen Möglichkeiten an den Strahlrohren von Hochbrillanzquellen erschließen naturgemäß neue Aufgabenfelder für die Grundlagenforschung. Die Begründungen für die neuen Quellen und die übliche Politik des Zugangs für die Nutzer orientieren auf die Bevorzugung von Aufgaben an der Vorderfront der erkenntnisorientierten Forschung. Damit entsteht aber ein Defizit für den Einsatz leistungsfähiger Synchrotronstrahlungstechniken für die anwendungsorientierte Forschung.

### 1.3 Wissenschaftliche Felder für eine Synchrotronstrahlungsquelle in Rossendorf

Der Hauptteil der Nutzer von Synchrotronstrahlungsquellen läßt sich im wesentlichen 4 Fachgebieten zuordnen, deren Grenzen unter Umständen fließend sind.

- Physik
- Chemie
- Materialwissenschaften
- Lebenswissenschaften

In der inzwischen weitgehend neu strukturierten Forschungslandschaft des Freistaates Sachsen dominiert der Bereich der Materialforschung, wobei diese überwiegend durch Herangehensweisen der Grundlagendisziplinen Physik und Chemie geprägt ist. Somit ist die Grenze zwischen Festkörperphysik / -chemie und Werkstoffforschung in allen Forschungseinrichtungen relativ unscharf. Die hier ansässigen Forschungseinrichtungen der Materialforschung sind in Tabelle 1.2 zusammengestellt. Allein in den Dresdner Instituten sind rund 1000 Mitarbeiter im Bereich der Materialforschung tätig. Dazu kommen die Institute in den Fakultäten Naturwissenschaften und Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden. Zur Abstimmung der Forschungsthemen befindet sich daher ein Materialforschungsverbund Dresden in Gründung. Dagegen ist der Bereich Lebenswissenschaften noch gering repräsentiert, vor allem hinsichtlich naturwissenschaftlich geprägter Grundlagenarbeiten. Im Zuge des weiteren Ausbaus der beiden großen Universitäten in Dresden und Leipzig wird es aber auf dem Gebiet der Lebenswissenschaften noch einen merklichen Kapazitätswachstum geben.

Bei einem Vergleich der Forschungslandschaft Sachsens mit der der Nachbarländer Polen und Tschechien, die unter regionalen Gesichtspunkten in Entwicklungskonzeptionen einzubeziehen sind, sind starke Ähnlichkeiten im Profil der Forschungseinrichtungen festzustellen. In beiden Ländern gibt es eine größere Zahl von Instituten an den Hochschulen und an den Akademien der Wissenschaften, die in der Materialforschung und den Grundlagendisziplinen Physik und Chemie tätig sind [RO 92, S. 1-4 ff]. Eine Reihe von Wissenschaftlergruppen nutzen bereits jetzt für ihre Aufgaben Synchrotronstrahlungstechniken, indem sie in westeuropäischen Laboratorien Experimente durchführen. Ein Bedarf für den unmittelbaren Zugang zu einer Synchrotronstrahlungsquelle ist in beiden Ländern vorhanden, denn es gab in

der Vergangenheit mehrfach Bemühungen, die Errichtung einer nationalen Quelle bzw. auch eines Dreierprojektes Polen-CSFR-DDR in Gang zu bringen. Interessen- und Arbeitsgebiete von Forschergruppen beider Nachbarländer bezüglich Synchrotronstrahlung sind in Anlage B mit aufgeführt.

Tabelle 1.2: Forschungseinrichtungen in Sachsen, an denen Materialforschung betrieben wird

<b>1. Hochschulen</b>	
1) Technische Universität Dresden	
2) Technische Universität Chemnitz-Zwickau	
3) TU Bergakademie Freiberg	
4) Universität Leipzig	
	Mitarbeiter
<b>2. Institute der "Blauen Liste"</b>	
1) Forschungszentrum Rossendorf	445
2) Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden	295
3) Institut für Polymerforschung Dresden	170
4) Institut für Oberflächenmodifizierung Leipzig	60
<b>3. Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft für</b>	
1) Elektronenstrahl- und Plasmatechnik Dresden	75
2) Werkstoffphysik und Schichttechnologie Dresden	55
3) Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe Dresden	75
4) Umformtechnik und Werkzeugmaschinen Chemnitz	95
5) Mikroelektronische Schaltungen und Systeme Dresden	130
6) Automatisierung des Schaltkreis- und Systementwurfs, Dresden	30
7) Pulvermetallurgie und Verbundwerkstoffe Dresden	20
8) Akustische Diagnostik und Qualitätssicherung Dresden/Rossendorf	30

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 Forschungsarbeiten 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.

Bei der Art der in der Region betriebenen Materialforschung, die im übrigen auf eine lange Tradition zurückblicken kann, spielen Fragen nach der geometrischen, atomaren Struktur von Festkörpern und der mesoskopischen Struktur

(Gefüge, Grobstruktur) von Werkstoffen die zentrale Rolle. Für die Strukturaufklärung ist daher der Einsatz von Strahlenmethoden unverzichtbar. Besonders Röntgenstrahlen sind hier bereits bei konventionellen Quellen leistungsfähig. Es ist zu erwähnen, daß besonders im Raum Dresden auch andere Strahlenarten zur Analyse aber vor allem auch zur Modifikation von Festkörpern wissenschaftlich und technologisch etabliert sind: Elektronenstrahlen, Ionenstrahlen, Laserstrahlen.

Die Synchrotronstrahlung kann wegen ihrer einzigartigen Eigenschaften die Möglichkeiten der Strukturuntersuchungsmethoden quantitativ und qualitativ verbessern. Die moderne Werkstoffforschung bedarf zunehmend dieses Instrumentes, das völlig neue Untersuchungsmethoden erschließt aber auch bei konventionellen Techniken Genauigkeit und Informationsgehalt verbessert. 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 die 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) erlaubt de facto die Untersuchung von einkristallinen Bereichen im Polykristall. Es wird auch der Nachweis leichter Elemente oder die Unterscheidung von Elementen wenig unterschiedlicher Ordnungszahl im Kristallgitter möglich (bisher der Neutronendiffraktion vorbehalten). Die Ausnutzung der wellenlängenabhängigen Streukraftänderung (anomale Dispersi-



on) 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.

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 ~~Total~~ Reflexion 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. Die in-situ-Beobachtung von Materialmodifikationen, z. B. durch Teilchenstrahlen, eröffnet für diesen Forschungszweig völlig neue Möglichkeiten. Auch hier geht es um die Untersuchung oberflächennaher Schichten, die hohe Brillanz erfordert.

Weite Verbreitung hat bereits das **EXAFS-Verfahren**, d.h. die Untersuchung von Interferenzeffekten in der Röntgenabsorption zur Bestimmung der Umgebungsstruktur des absorbierenden Atoms, gefunden. Insbesondere die Elementselektivität, die man durch die Wahl der entsprechenden Absorptionskante erreicht bietet auch Zugang zu lokalen Veränderungen im Werkstoff. Werden zum Nachweis des Effektes die emittierten Fotoelektronen oder bei inneren Grenzflächen die Röntgenfluoreszenzstrahlung genutzt, so wird damit eine hohe Oberflächenselektivität erreicht.

Die in der Materialforschung eingesetzten Synchrotronstrahlungsmethoden und ihre Aussagekraft werden im Anhang I.B genauer dargestellt. Die konkret ins Auge gefaßten Arbeitsfelder der wissenschaftlichen Einrichtungen der Region sind im Anhang I.C zusammengetragen. Daraus ergibt sich die in Tabelle 1.3 enthaltene Aufzählung von Experimenten, die eine solche Synchrotronstrahlungsquelle unbedingt gestatten muß.

Tabelle 1.3: An einer Synchrotronquelle für die Materialforschung von Nutzern der Region geforderte Experimentiertechniken

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

Methode / Aufgabe	Institut
<p>* <i>Röntgendiffraktometrie</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Phasenanalyse insbesondere auch an mehrphasigen Materialien mit linienreichen Beugungsbildern: Metalle, Halbleiter, Keramiken, HT-Supraleiter, Polymersysteme</li> <li>• Strukturverfeinerungen und Hochauflösungsexperimente an poly- und einkristallinen Werkstoffen</li> <li>• Strukturuntersuchungen an Oberflächen, Grenzflächen und dünnen Schichten, auch mit hoher Auflösung</li> <li>• Strukturuntersuchungen an amorphen Stoffen, Schmelzen und Polymeren</li> <li>• zeitaufgelöste Untersuchungen zur Kinetik oder Dynamik von Phasenbildung und Phasenumwandlungen sowie von Fällungsreaktionen mit der Möglichkeit des Studiums der Effekte in äußeren Feldern</li> <li>• lokale Strukturanalyse im Bereich von 1 µm</li> <li>• hochaufgelöste Profilanalyse</li> </ul>	<p>alle Institute</p> <p>TUD, TUC, BAF, IFW, FZR, UL</p> <p>TUD, TUC, FZR, BAF, FhG</p> <p>TUC, IFW, IPF</p> <p>TUD, IFW, TUC, BAF, IPF</p> <p>IFW, TUD, TUC</p> <p>IFW, BAF, TUD</p>
<p>* Nutzung der <i>anormalen Röntgenbeugung</i> zur Ermittlung von Strukturdetails durch elementspezifische Beugungsdaten</p>	<p>TUD, IFW, BAF, TUC, FZR</p>
<p>* <i>Kleinwinkelstreuung</i> für die Untersuchung von Inhomogenitäten in festen Phasen, der Bildung und Umwandlung von Defektstrukturen (Strahlungsdefekte) und von Ordnungen mittlerer Reichweite in Schmelzen, Lösungen und Polymeren (auch unter Einbeziehung der anomalen Dispersion)</p>	<p>TUC, FZR, FhG, IFW, IPF</p>
<p>* <i>EXAFS</i> zur elementspezifischen Untersuchung der Nahordnung in Metallen, Keramiken sowie amorphen oder nanokristallinen Schichten</p>	<p>IFW, TUC, UL, TUD, FZR, BAF, FhG</p>
<p>* <i>XANES</i></p>	<p>TUD, TUC, UL</p>
<p>* <i>Textur- und Eigenspannungsanalyse</i></p>	<p>TUD, BAF, TUC, FZR, FhG, IPF</p>
<p>* <i>Röntgenmikrotomographie</i> an mehrphasigen Werkstoffen und Kompositen (Faser- und Schichtverbunde)</p>	<p>TUC, BAF, TUD</p>
<p>* <i>Röntgenfluoreszenzanalyse</i> hoher lateraler Auflösung zur chemischen Charakterisierung von Einschlüssen</p>	<p>BAF, FZR, TUD</p>
<p>* spektroskopische Verfahren mit hoher Tiefenauflösung zur Charakterisierung von Oberflächen und Grenzflächen</p>	<p>TUD, TUC, FZR, IFW</p>

Neben dem dominierenden Gebiet der Materialforschung gibt es speziell im Forschungszentrum Rossendorf starkes Interesse am Einsatz von Synchrotronstrahlung für Aufgaben der *Radiochemie*. Forschungsschwerpunkt des Institutes für Radiochemie im FZR wird das Transportverhalten von Radionukliden in hydrogeologischen Medien sein. Zielstellung ist die Aufklärung von Grundlagenmechanismen der Migration als Basis für die Entwicklung realistischer Modelle. Letztere sind wesentlich für die Sanierung vorhandener radioaktiver Umweltkontaminationen, was mit der WISMUT auch einen stark regionalen Bezug hat und für Fragen der Lagerung radioaktiver Abfälle generell. Solche Modelle auch übertragbar auf die Migration von Schadstoffen allgemein.

Zur quantitativen Beschreibung des hydrologischen Transports und des Sorptionsverhaltens von Radionukliden ist eine genaue Kenntnis der beteiligten chemischen Vorgänge erforderlich. Diese Kenntnis muß auf molekularer Ebene gewonnen werden, um die Mechanismen der Transportprozesse aufzuklären.

Während der letzten Jahre hat neben den Labormethoden wie ESR, NMR, FTIR die Methode der Röntgen-Absorption-Spektroskopie (XAS) zunehmende Verwendung in der Erforschung von Adsorptionsprozessen an Oberflächen gefunden. Zur Anwendung dieser Technik wird monochromatische Röntgenstrahlung benötigt, die mit Hilfe eines Synchrotrons erzeugt wird. Die zunehmende Verfügbarkeit von Synchrotronstrahlung mit guter Intensität steht deshalb in direktem Zusammenhang mit der rapiden Zunahme der Verwendung dieser Technik. Mit Hilfe von XAS können viele chemische Elemente in der Fest-, Flüssig- und Gasphase untersucht werden. Wegen der hohen Intensitäten der Synchrotronstrahlung können auch sehr kleine Konzentrationen eingesetzt werden. Mit den geplanten neuen Synchrotronquellen der dritten Generation wird es daher möglich sein, die Erfassungsgrenze noch weiter zu senken. Die XAS ist eine elementspezifische Methode, die Aussagen über die Oxidationsstufe, die Bindungsverhältnisse und die nächsten Nachbarn eines adsorbierten Atoms gibt.

Das Gebiet der Aktiniden- und Radionuklidforschung mit XAS erscheint nahezu unerschlossen zu sein. Im Institut für Radiochemie sind folgende Forschungsprojekte mit XAS geplant:

- Speziation und Komplexierung der Aktiniden in umweltrelevanten Lösungen,
- Aufklärung des Adsorptionsverhaltens von Aktiniden an Mineralien und Feststoffen (mit einem Schwerpunkt auf der Erforschung des Urans an Materialien, die in der Umgebung der WISMUT zu finden sind),
- Aufklärung der Adsorptionsmechanismen und eventueller Oxidationsstufenveränderungen der Aktiniden an biologischen Materialien.

Der Einsatz von Lanthanidenelementen als Modellverbindungen für bestimmte Aktinidenelemente ist ebenfalls geplant.

Für diese Untersuchungen eignen sich die L-Röntgenabsorptionskanten, die im Energiebereich zwischen 16,3 keV und 23,1 keV liegen. Die  $L_{III}$ -Kanten, mit

Energien um etwa 17 keV, bieten sich wegen ihrer guten Ausbeute besonders an.

Das Aufgabenfeld des Institutes für *Bioanorganische* und *Radiopharmazeutische Chemie* im FZR liegt im Grenzbereich zwischen Chemie und Medizin, es befaßt sich mit radioaktiven Tracern für die Medizin. Der zentrale Ansatzpunkt ist der Zusammenhang zwischen Eigenschaften der Moleküle und ihrem Verhalten in Biosystemen. Dazu ist auch die Molekülcharakterisierung hinsichtlich der Atomstruktur essentiell. Da meist mit äußerst geringen Substanzmengen oder geringen Tracerkonzentrationen gearbeitet wird, ist die Nutzung von Synchrotronstrahlung für die Strukturaufklärung angezeigt. Die zu untersuchenden Moleküle sind sowohl organische Verbindungen als auch Koordinationsverbindungen des Technetium, Rhenium, Ruthenium, Platin, Vanadium, Titan oder Bor. Für die Bioanorganische Chemie aussagekräftige Strukturparameter sind Bindungswinkel, Bindungsabstände, Bindungsverzerrungen und Beschreibung der 1. Koordinationssphäre des Metalls. Die für diese Untersuchungen notwendigen Experimentiermethoden sind Röntgendiffraktion (insbesondere auch mit hoher Auflösung), Kleinwinkelstreuung und Röntgenabsorptionsspektroskopie (EXAFS, XANES). Die Anforderungen an die technologische Ausstattung der Experimentierplätze unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denen der Materialforschung, wenn man von der Arbeit mit schwach radioaktivem Probenmaterial absieht.

#### 1.4 Forderungen an eine Synchrotronstrahlungsquelle ROSY

Ein wesentliches Erfordernis für eine moderne Werkstoffforschung in Sachsen ist der leichte Zugang und ein kontinuierliches 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.

Die Forderungen an die Quelle leiten sich hauptsächlich aus dem geplanten Forschungsprofil der Institute der Region her, zu dem einige von ihnen konkretere Vorstellungen entwickelt haben, die im Anhang I.C enthalten sind. Grundsätzlich kann man sagen, daß alle wesentlichen regionalen Nutzer, auch außerhalb der Materialforschung, Strahlung im Bereich der harten Röntgenstrahlung benötigen. Aus den Befragungen und den geplanten Arbeitsprogrammen lassen sich folgende technischen Forderungen an die Synchrotronstrahlungsquelle ableiten:

- Die Strahlung muß im harten Röntgenbereich liegen (6-18 keV). Für die geplanten Strukturuntersuchungen sollte der nutzbare Energiebereich nach oben bis zu 50 keV gehen. Für die chemischen Anwendungen spielt Absorptionsspektroskopie an Kanten des Technetiums sowie des Urans

und seiner Nachbarn eine wesentliche Rolle. Dort ist der typische Energiebereich 15-25 keV.

- Es werden hohe Brillanzen ( $>10^{15}$  phot./mm<sup>2</sup> mrad<sup>2</sup> s 0,1% BW) für Experimente an sehr kleinen Proben (Einkristalle, Tracersubstanzen), dünnen Schichten und Oberflächen sowie für Experimente im Mikrobereich von Festkörpern (z.B. Rißspitze) gewünscht.
- Eine Vielzahl der jetzt absehbaren Aufgaben zielt auf die Nutzung der anomalen Dispersion bei Strukturuntersuchungen ab. Aus der Forderung nach kontinuierlicher Durchstimbarkeit der Energie folgt, daß bei den Einbaueinrichtungen (insertion devices) vorzugsweise Wiggler notwendig sind.
- Experimente zur Kinetik von Reaktionen und Phasenveränderungen erfordern Strahllebensdauern von  $>5$  Stunden.

Neben diesen Forderungen an die maschinentechnische Gestaltung der Quelle folgt aus den Interessen des regionalen Hauptnutzerpotentials, der Materialforschung, eine wesentliche Forderung an das Nutzungsregime.

- Die Nutzerpolitik muß auf kontinuierliche Arbeitsmöglichkeiten für Materialforscher ausgerichtet sein.

Bei den existierenden Synchrotronstrahlungsquellen findet man in der Regel ein Nutzerregime, bei dem die Meßzeit nach einem Wettbewerbsprinzip vergeben wird. Maßstab ist in erster Linie der Neuigkeitswert des Experimentes, d.h. die Suche nach neuen Effekten oder die Erarbeitung neuer Methoden haben Vorrang. Zusätzlich haben Experimente mit geringem Meßzeitbedarf bei Erwartung attraktiver wissenschaftlicher Grundlagenergebnisse bessere Chancen. Unter solchen Prämissen haben Experimenttypen wie sie für die Materialforschung charakteristisch sind mit erschwertem Zugang zu rechnen. Die Materialforschung erfordert häufig die systematische Untersuchung von Probenreihen, deren Einzelexperimente nicht unbedingt attraktive neue Ergebnisse bringen. Erst am Ende solcher größeren Untersuchungsreihen sind wesentliche Erkenntnisfortschritte zu erwarten.

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 oder es sich um Vielkomponentensysteme handelt.

Wegen dieser geringen Zusammensetzungsvariation 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. Es müssen 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.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Anforderungen auf eine Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation abzielen, die einen zuverlässigen Betrieb für einen möglichst breiten Nutzerkreis mit Blick auf anwendungsorientierte Forschungsarbeiten ermöglicht.

## 1.5 Stellung von ROSY im nationalen Rahmen

Aus Tabelle 1.1 ist ersichtlich, daß es in der Bundesrepublik Deutschland bereits Synchrotronstrahlungslaboratorien gibt und auch weitere Projektvorschläge für neue Synchrotronstrahlungsquellen in Karlsruhe, Mainz und Bonn existieren.

Die Berliner Synchrotronstrahlungsquelle BESSY und auch der Nachfolger BESSY II, dessen Bau im vergangenen Jahr genehmigt wurde, bedienen den weichen Röntgenbereich. BESSY II wird eine Hochbrillanzquelle im VUV/XUV-Bereich sein.

Im harten Röntgenbereich existieren die Quellen DORIS III bei DESY und ELSA an der Universität Bonn. Beide Ringe arbeiten schon längere Zeit. Sie wurden ursprünglich für die Kern- und Teilchenphysik konzipiert und weisen eine relativ große Emittanz der Strahlung auf. Sie sind bedingt als Synchrotronstrahlungsquellen der 2. Generation zu bezeichnen.

Die Projektvorschläge in Karlsruhe, Mainz und Bonn orientieren sich auf eine Quelle, die vorzugsweise für die industrielle Nutzung im Bereich der Mikrostrukturtechnik bereitgestellt werden soll. Dort bestehen keine hohen Anforderungen an die Emittanz, so daß die Konzepte (mit Ausnahme von LISA) sehr große Werte dafür ausweisen.

Der Projektvorschlag ROSY geht davon aus, daß zum Ende des Jahrzehnts auch in Deutschland der Bedarf an einer Synchrotronquelle der 3. Generation im harten Röntgenbereich vorhanden ist. Damit würde auch ein Äquivalent zu BESSY II geschaffen, wo für den VUV/XUV-Bereich eine Quelle der 3. Generation entsteht.

Gleichzeitig soll die nationale Quelle nicht eine Dopplung des europäischen Projektes ESRF darstellen, sondern sich vielmehr auch als Vorbereitungsplatz für ausgewählte Experimente an der ESRF verstehen. Das entspricht im Grundsatz dem Konzept, das vor rund 20 Jahren mit dem Hochflußreaktor des ILL in Grenoble verfolgt wurde und das sich bewährt hat.

Der dritte Aspekt ist die vorzugsweise Nutzung von ROSY für anwendungsorientierte Forschungen. Aus regionaler Sicht bildet die Materialforschung in der Umgebung des vorgeschlagenen Standortes

Rosendorf schon ein beachtliches Nutzerpotential. Ein solches Projekt sollte aber unter dem Gesichtspunkt eines nationalen Zentrums gestaltet werden, was schließlich auch die Berücksichtigung weiterer Interessen, speziell der Grundlagenforschung, bei der weiteren Gestaltung des Projektes erfordert. Schließlich würde die Errichtung von ROSY auch ein wesentlicher Kristallisationspunkt für die wissenschaftliche und technologische Entwicklung in der Region sein und auch die Verbindungen zu den Nachbarländern Polen und Tschechien im Sinne der angestrebten Euroregion essentiell stärken.

## 2 Das technische Konzept für die Synchrotronstrahlungsquelle ROSY

Entsprechend den vorgenannten Forschungsaufgaben, die brillante Synchrotronstrahlung im harten Röntgenbereich benötigen, wurde das technische Konzept für die Quelle ROSY entwickelt. Eine zusätzliche Prämisse war es einen möglichst kompakten Speicherring zu gestalten, der dann auch kostengünstig zu errichten ist.

Das technische Konzept wird hier nur summarisch dargestellt. Der ausführlichen Darstellung und der Behandlung der Teilsysteme und -komponenten ist der Teil II des Berichtes gewidmet.

Es muß vorwiegend Synchrotronstrahlung im Energiebereich von 5 - 18 keV ( $E_c = 9$  keV) emittiert werden. Bei einer magnetischen Flußdichte in den Ablenkmagneten von etwa 1.4 Tesla (normalleitende Magnete) folgt hieraus eine Energie des Speicherringes von etwa 3 GeV und ein Radius in den Ablenkmagneten von 7 - 10 Metern.

Für ROSY wurde eine neue Magnetstruktur, die *modifizierte FODO - Struktur*, entwickelt. Mit dieser neuartigen Struktur wird bei einer 3 GeV-Maschine und einem Umfang von 148 Metern eine Emittanz von  $28 \pi$  nm rad erreicht und es stehen 8 Einbauplätze für Insertion Devices mit einer Gesamtlänge von 35 Metern zur Verfügung. Das entspricht 23,6% des Umfanges und ist vergleichbar mit anderen im Bau oder der Projektierung befindlichen Quellen (vgl. Abb. 2.1). Mit diesem hohen Anteil und der obengenannten Emittanz ist ROSY die erste Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation im Energiebereich 3 GeV.

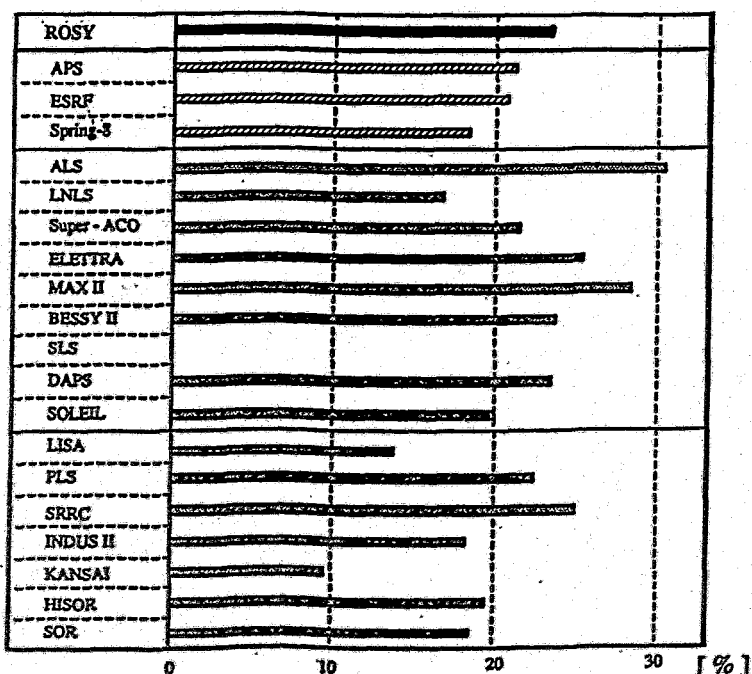


Abb. 2.1:  
Prozentualer Anteil  
der insgesamt ver-  
fügbaren Länge für  
insertion devices bei  
Synchrotronstrah-  
lungsquellen der 3.  
Generation. (nach  
[Wr 92])



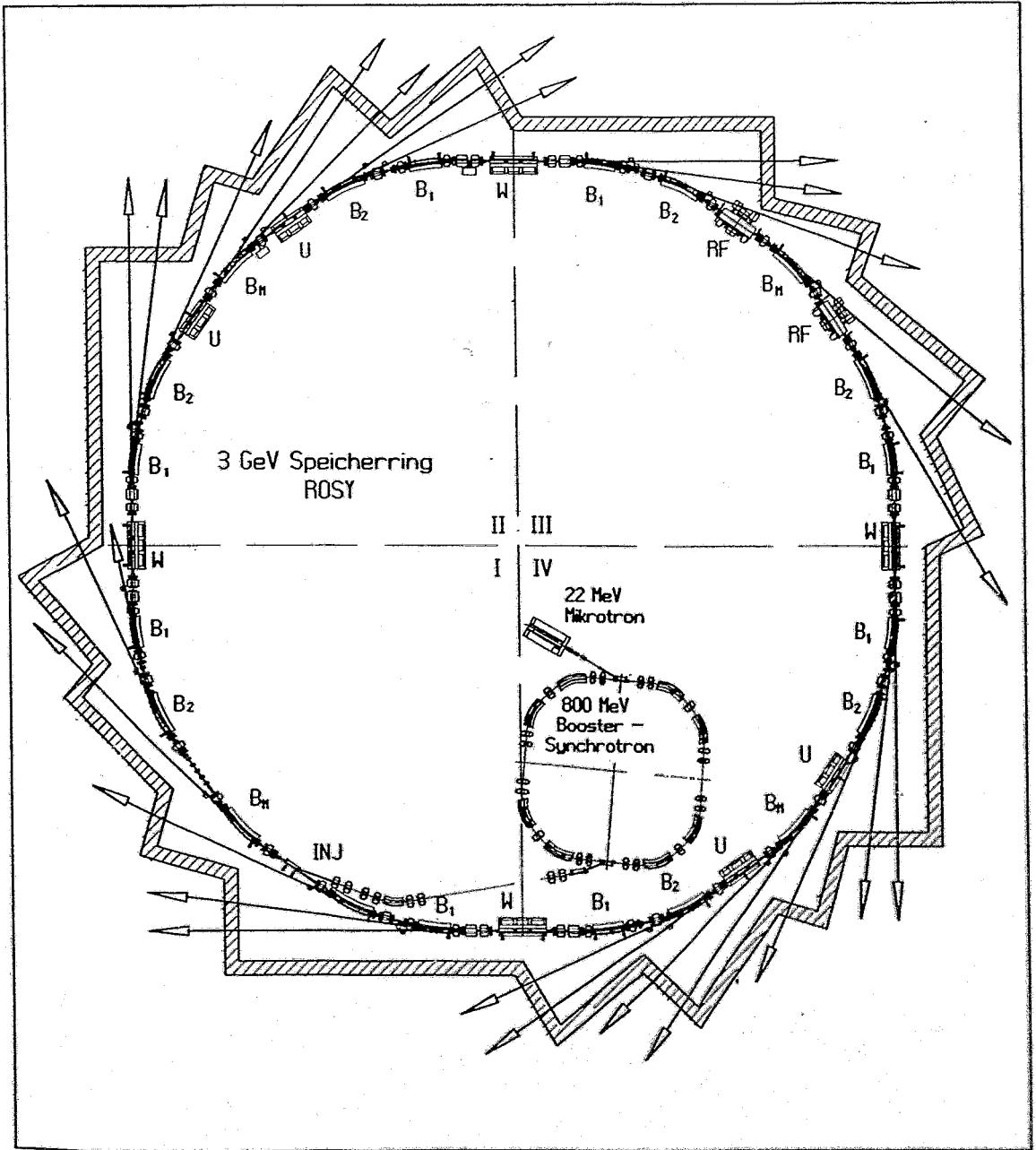


Abb. 2.2: Übersicht über den Speicherring der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY. Die wesentlichen Parameter der Wiggler und Undulatoren sind mit angegeben.

Der Gesamtaufbau des Speicherringes ROSY ist in Abbildung 2.2 dargestellt. ROSY besitzt eine Vierersymmetrie mit einem achromatischen Bogen über  $90^\circ$ . Der Achromat enthält 2 Ablenkmagneten mit einer Ablenkung von  $15^\circ$  (Bezeichnung  $B_1$ ) und 3 Ablenkmagneten mit einer Ablenkung von je  $20^\circ$  ( $B_2$  und  $B_M$ ). Die Ablenkmagneten haben eine vertikal fokussierende Funktion wodurch der kompakte Entwurf der Maschine bei gleichzeitig geringer Emittanz möglich wird. In Abb. 2.3 ist der Verlauf des Strahlquerschnittes über einen achromatischen Bogen durch die Größen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  dargestellt. Für die Positionen der Ablenkmagneten sind die Werte des Strahlquerschnittes explizit angegeben.

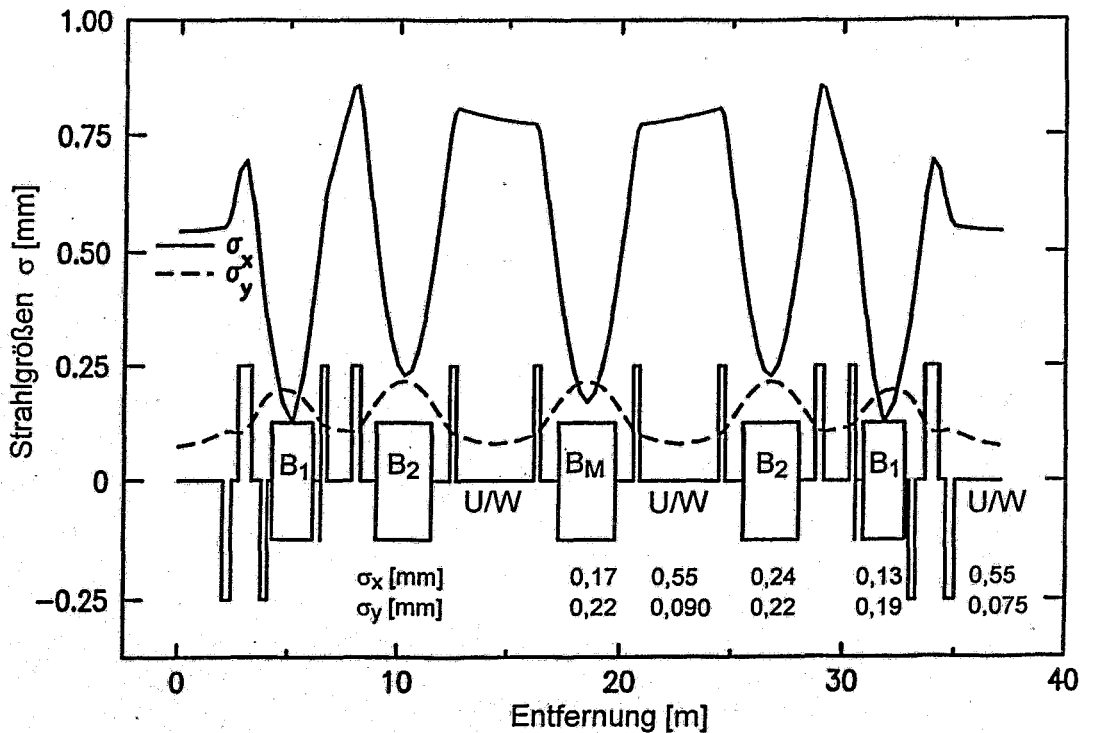


Abb. 2.3: Verlauf der Strahldimension in einem achromatischen Bogen des Speicherringes ROSY. Für die Positionen der Ablenkmagneten (Kästchen) und in der Mitte der Einbaustellen für Undulatoren und Wiggler sind die Dimensionswerte explizit angegeben.

Durch die Vierersymmetrie entstehen 4 lange gerade Abschnitte (Bezeichnung W in Abb. 2.2) in denen die Dispersionsfunktion Null ist. Um diese Bereiche für den Einbau von Undulatoren oder Wiggler zu gewinnen, wurden die Injektion des Strahles und die Hochfrequenzeinspeisung in die geraden Strecken der Bögen verlegt und zwar an Positionen an denen die Dispersionsfunktion klein ist. Pro Bogen gibt es zwei solche Positionen. Die analogen geraden Strecken in den beiden achromatischen Bögen, die nicht durch Injektion und HF in

Anspruch genommen werden (Bezeichnung U in Abb. 2.2) sind als zusätzliche Einbauplätze für Wiggler oder Undulatoren vorgesehen. Hier ist die Dispersionsfunktion nicht Null. Rechnungen zeigen jedoch, daß durch den Einbau von Wiggeln oder Undulatoren an diesen Plätzen die Emittanz des Speicherringes nicht vergrößert wird (vgl. II.4). Die Vergrößerung des Strahlquerschnittes in x-Richtung durch die Dispersionsfunktion in diesem Bereich liegt bei 20%.

In Abb. 2.4 sind die Bereiche der geraden Abschnitte zwischen und in den Bögen, die für den Einbau von Wiggeln und Undulatoren vorgesehen sind, im Detail dargestellt.

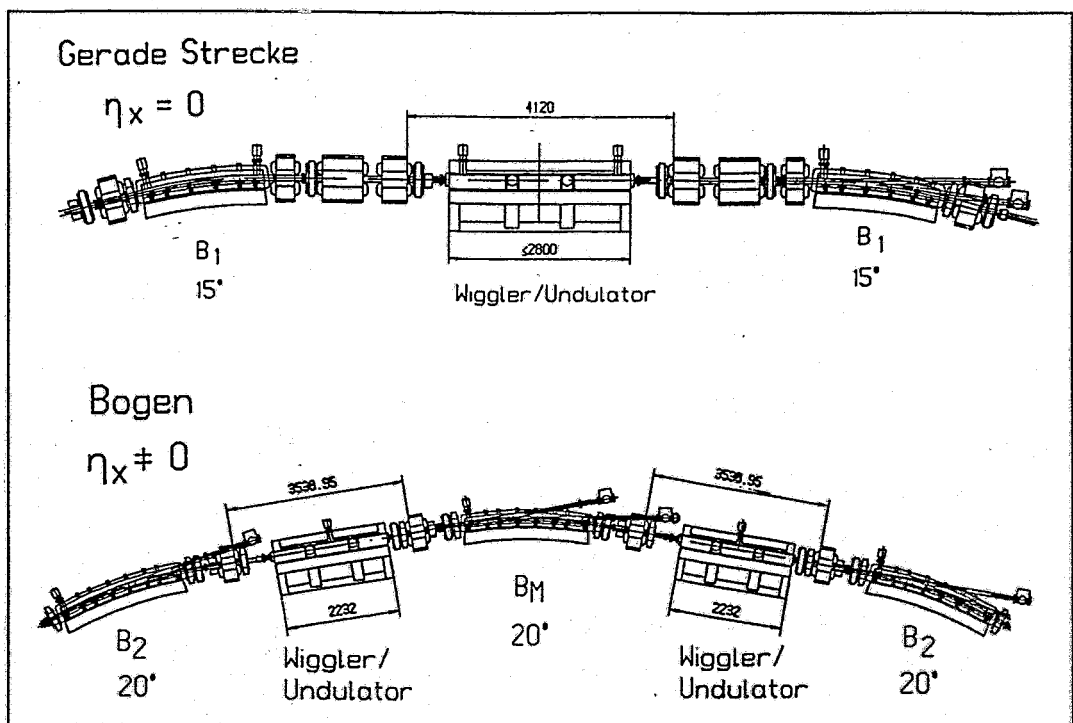


Abb. 2.4: Darstellung der Einbaupositionen für Wiggler und Undulatoren in den geraden Stücken zwischen den achromatischen Bögen (oben) und in den geraden Abschnitten innerhalb der Bögen (unten)

Die Parameter der vorgeschlagenen Synchrotronstrahlungsquelle ROSY sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt und orientieren sich an den regionalen Nutzerinteressen, aber auch an Überlegungen zur Einpassung des Projektes in das Spektrum existierender und geplanter Quellen. Sie dürften in hohem Maße die Forderungen der strukturbezogenen Materialforschung und der Festkörperphysik und -chemie generell befriedigen, so daß eine solche Synchrotronstrahlungsquelle ein nationales Zentrum sein kann.

Tabelle 2.1: Parameter der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY

kritische Energie der Strahlung, $E_c$	8,4 keV
kritische Wellenlänge, $\lambda_c$	0,15 nm
Elektronenenergie	3,0 GeV
Elektronenstrom	100 (250*) mA
natürliche Emittanz	$28,5 \pi$ nm rad
Strahllebensdauer	$\geq 24$ h
Speicherringumfang	148,1 m
Speicherringstruktur	FODO (modifiziert)
Anzahl der Symmetriezellen	4
natürliche Energiebreite	0,1 %
momentum compaction factor	$6,6 \times 10^{-3}$
Hochfrequenz	352,2 MHz
Arbeitspunkte $Q_x / Q_z$	8,84 / 4,75
natürl. Chromatizität $\xi_x / \xi_y$	-18,5 / -11,1
Anzahl der Dipolmagnete $15^\circ / 20^\circ$	8 / 12
Biegeradius auf Orbit	7,148 m
Magnetfeld $B_{max}$ auf Orbit	1,4 T
Gradient in den Dipolmagneten	2,8283 T/m
Anzahl der Quadrupole 0,3/0,4/0,66 m	24 / 24 / 8
maximaler Gradient	20 T/m
Stärke K	$2 \text{ m}^{-2}$
Anzahl der Sextupole 0,1 m	56
differentieller Gradient $G'$	$500 \text{ T/m}^{-2}$
Stärke M	$50 \text{ m}^{-3}$
Injektionsenergie (Booster Synchrotron)	800 MeV
Pulsstrom (Booster Synchrotron)	10 mA
Wiederholrate (Booster Synchrotron)	10 Hz
Plätze für Wiggler / Undulatoren	4 + 4
Länge der geraden Strecken	4,12 m / 3,54 m

\* in einer zweiten Ausbaustufe

Bei der Erarbeitung eines Maschinenkonzeptes ist zu untersuchen, welche Möglichkeiten der Weiterentwicklung vorhanden sind. Für ROSY kann allgemein festgestellt werden, daß die insgesamt vorhandenen 8 freien Plätze für mögliche Weiterentwicklungen genutzt werden könnten. Zusätzlich läßt es das Konzept zu, die mittleren Ablenkmagneten im Achromaten durch supraleitende zu ersetzen. Unter der Annahme, daß diese bei einer magnetischen Flußdichte von 4,5 T betrieben werden, verschiebt sich die kritische Energie der Synchrotronstrahlung aus diesen Magneten um den Faktor 3 zu höheren Energien. Damit würde der Anwendungsbereich von ROSY wesentlich erweitert werden.

Der normaleitende Ablenkmagnet von ROSY hat einen Gradienten. Diesen würde man in einem supraleitenden Magneten nicht vorsehen. Vielmehr sind

2 zusätzliche Quadrupole anzuordnen. Der Umfang der Maschine bleibt dabei erhalten. Die Magnetstruktur von ROSY mit supraleitenden Ablenkmagneten ist in Abb. 2.5 dargestellt. Weitere Einzelheiten sind im Teil II, Maschinenkonzept, ausgeführt.

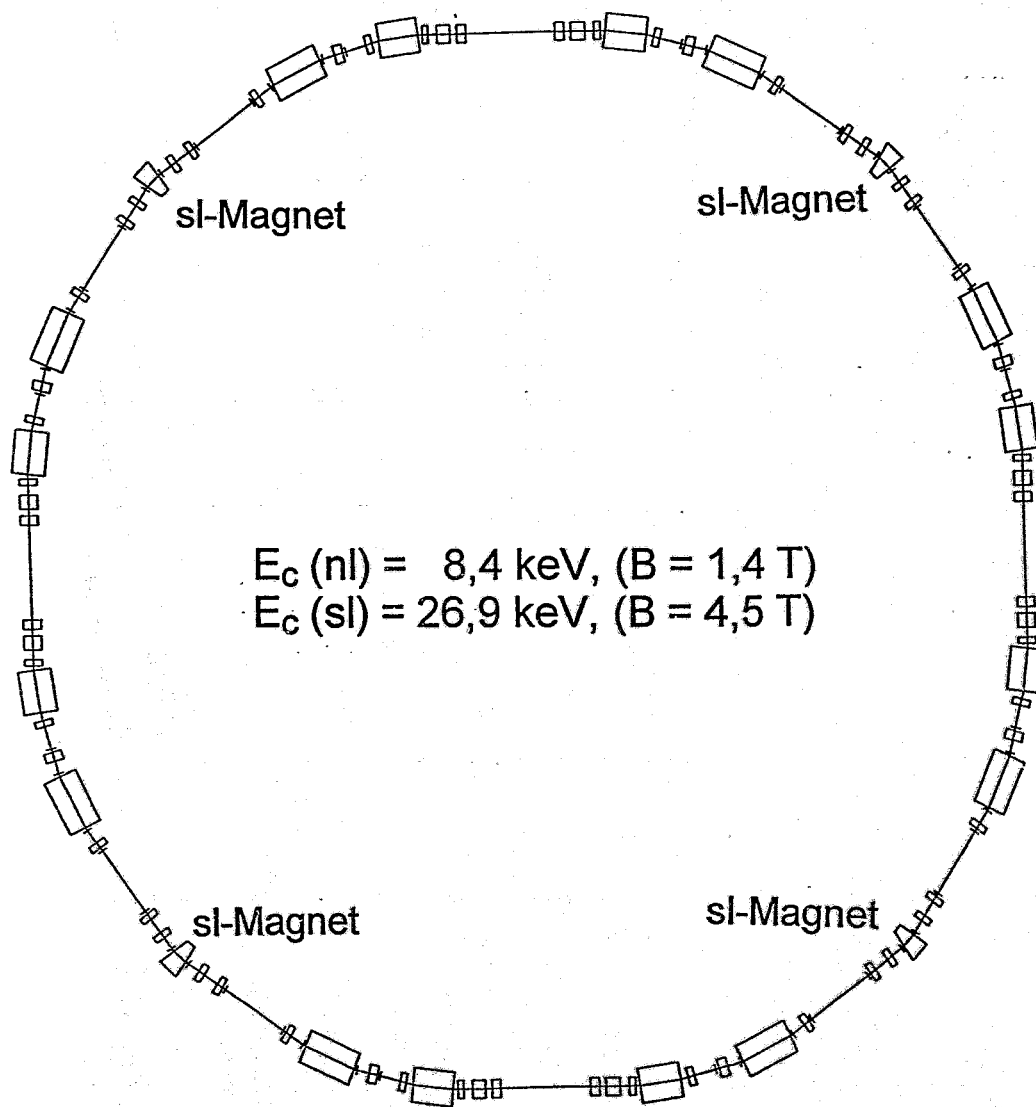


Abb. 2.5: Magnetstruktur von ROSY mit supraleitenden Ablenkmagneten.

Für den Nutzer entscheidende Größen sind die Spektren von Photonen aus verschiedenen Elementen der Quelle, wiedergegeben durch den Photonenfluß und die Brillanz sowie die Strahldimensionen. Dabei ist natürlich auch der Vergleich mit anderen Quellen von Synchrotronstrahlung wichtig. Die Abbildungen 2.5 und 2.6 zeigen berechnete Spektren für ROSY sowie die Quellen DORIS III (DESY, Hamburg), ESRF (Grenoble) und BESSY II (Berlin). Die für die Rechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Tabelle 2.2: Parameter für die Berechnung der Photonenflüsse und Brillanzen [Gü 93]

ROSY: 3 GeV; 100 mA

Einheit	$\sigma_x$ [mm]	$\sigma_y$ [mm]	$\sigma'_x$ [mrad]	$\sigma'_y$ [mrad]
Ablenkmagnet: R=7,15m	0,13	0,19	0,20	0,014
Wavelength Shifter: R=2m; B=5T	0,13	0,19	0,20	0,014
Wiggler: B=1,5T; N=28; $\lambda_0=12,5$ cm	0,51	0,064	0,051	0,041
Undulator: B=0,56T; N=48; $\lambda_0=5,2$ cm	0,51	0,064	0,051	0,041

DORIS III: 4,5 GeV; 100 mA

Einheit	$\sigma_x$ [mm]	$\sigma_y$ [mm]	$\sigma'_x$ [mrad]	$\sigma'_y$ [mrad]
Ablenkmagnet: R=12,2m	1,89	0,54	0,46	0,025
Wiggler: B=1,17T; N=28; $\lambda_0=14$ cm	1,96	0,55	0,22	0,018
Undulator XUV2: K=5.6; N=33; $\lambda_0=12$ cm	3,01	0,37	0,163	0,036
Undulator XUV3: K=4,7; N=44; $\lambda_0=9$ cm	3,01	0,37	0,163	0,036
Undulator XU: K=1,76; N=128; $\lambda_0=3,14$ cm	2,58	0,23	0,25	0,059

ESRF: 6 GeV; 100 mA

Einheit	$\sigma_x$ [mm]	$\sigma_y$ [mm]	$\sigma'_x$ [mrad]	$\sigma'_y$ [mrad]
Ablenkmagnet: R=25m	0,16	0,129	0,137	0,005
Wiggler: B=1,2T; N=12; $\lambda_0=12,5$ cm	0,055	0,037	0,097	0,018
Undulator: K=2,06; N=33; $\lambda_0=4,6$ cm	0,44	0,084	0,018	0,012

BESSY II: 1,7 GeV; 100 mA

Einheit	$\sigma_x$ [mm]	$\sigma_y$ [mm]	$\sigma'_x$ [mrad]	$\sigma'_y$ [mrad]
Ablenkmagnet: R=4,36m	0,049	0,098	0,13	0,0062
Wiggler W100: B=1,04T; N=40; $\lambda_0=10$ cm	0,31	0,043	0,019	0,014
Undulator U-52: K=2,5; N=80; $\lambda_0=5,2$ cm	0,31	0,043	0,019	0,014

In Abb. 2.6 sind berechnete Photonenflüsse und Brillanzen der Synchrotronstrahlung aus Ablenkmagneten dargestellt. Neben den bisher erwähnten normalleitenden Ablenkmagneten wurde auch das Spektrum beim Einbau eines supraleitenden Ablenkmagneten (Wellenlängenschieber - WLS) modelliert. Der Photonenfluß erhöht sich mit der Energie ( $\sim E$ ) und der Spektralbereich wird durch Energie und magnetischen Fluß bestimmt ( $\sim B \cdot T^2$ ). ROSY liegt mit 3 GeV zwischen BESSY II und der ESRF wie in Abb. 2.6 a ersichtlich. Durch den späteren Einbau eines supraleitenden Ablenkmagneten kann etwa derselbe Spektralbereich überstrichen werden wie bei der ESRF. Der Photonenfluß an den experimentellen Stationen hängt neben den Strahlparametern auch vom Raumwinkel ab, den das erste optische Element des Strahlrohres erfaßt. Bei ROSY ist es aufgrund des kompakten Entwurfes möglich, bei 10 Meter vom Quellpunkt die optischen Elemente anzuordnen. Diese Entfernungen betragen bei der ESRF etwa 30 Meter oder bei DORIS III etwa 20 m. Dadurch kann ROSY als eine Synchrotronstrahlungsquelle mit sehr hohem Fluß betrachtet werden, d.h. es ergeben sich in Abhängigkeit von der Strahlrohrkonstruktion noch zusätzliche Intensitätsvorteile im Vergleich zu Abb. 2.6 a. Beim Vergleich der Brillanzen aus den Ablenkmagneten der verschiedenen Quellen ist die Emittanz der wesentliche Einflußfaktor. Entsprechend der Emittanz von etwa  $30 \pi \text{ nm rad}$  ist die Brillanz bei ROSY um einen Faktor von 15 höher als bei DORIS III ( $300 \pi \text{ nm rad}$ ) und um einen Faktor 5-8 kleiner als bei BESSY II und der ESRF ( $6 \pi \text{ nm rad}$ ).

Analoge Rechnungen zur Brillanz wurden für die Einbauelemente Wiggler und Undulatoren ausgeführt und sind in Abb. 2.7 dargestellt. Die Wiggler überdecken bei der ESRF, ROSY und DORIS etwa den gleichen Spektralbereich. Bei den Undulatoren sind DORIS und ROSY hinsichtlich des Spektralbereiches vergleichbar, jedoch erreicht ROSY eine um den Faktor 100 höhere Intensität.

In Tabelle 2.3 sind Werte für die Strahlquerschnitte und Strahldivergenzen an typischen Positionen des Speicherringes angegeben.

Tabelle 2.3: Strahlquerschnitte  $\sigma_i$  [in mm] und Strahldivergenzen  $\sigma'_i$  [in mrad] für verschiedene Quellpunkt an ROSY. Die Brillanzen bei 100 mA Strahlstrom [in Phot./s  $\text{cm}^2 \text{ mrad}^2$  0,1%BW] sowie die Energien im Maximum der Intensität [in keV] sind ebenfalls angegeben.  
n-l = normalleitend; s-l = supraleitend;  
Wiggler:  $B=1,5 \text{ T}$ ,  $N=28$ ,  $\lambda_0=12,5 \text{ cm}$ ; Undulator:  $B=0,56 \text{ T}$ ,  $N=48$ ,  $\lambda_0=5,2 \text{ cm}$

Quelle	$\sigma'_x, \sigma_x$	$\sigma'_y, \sigma_y$	Brillanz	$E_{\lambda, \text{max}}$
Ablenkmagnet (n-l)	0,14; 0,23	0,23; 0,013	$1,5 \cdot 10^{14}$	8
Undulator	0,57; 0,055	0,078; 0,037	$2 \cdot 10^{17}$	0,5
Wiggler	0,61; 0,051	0,082; 0,035	$5 \cdot 10^{15}$	7
Ablenkmagnet (s-l)	0,14; 0,25	0,23; 0,013	$7 \cdot 10^{14}$	25

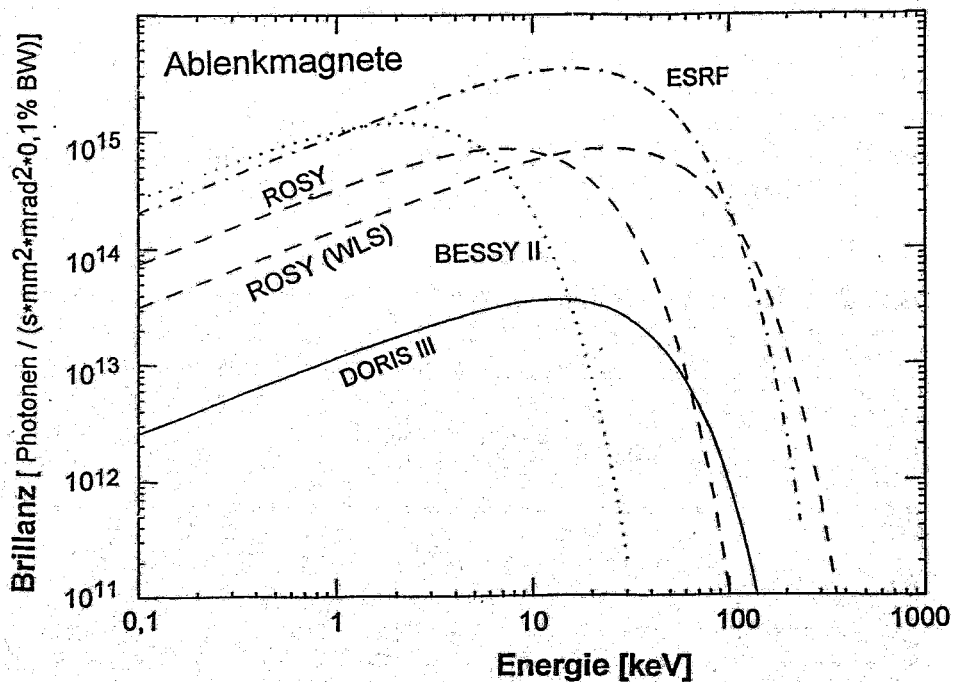
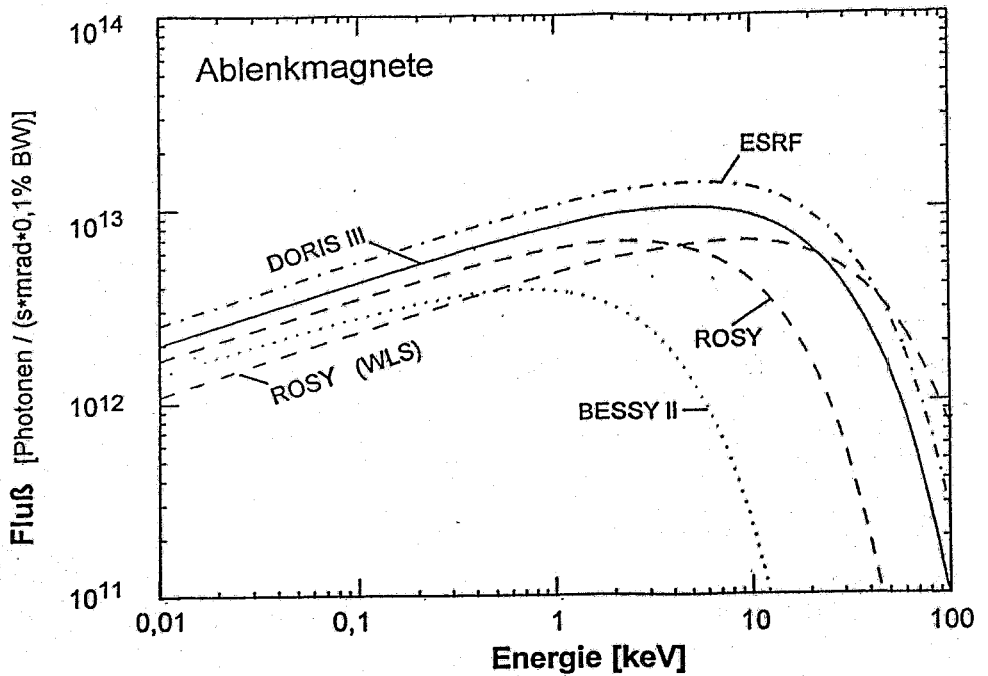


Abb. 2.6: Fluß und Brillanz der Synchrotronstrahlung aus Ablenkmagneten berechnet für verschiedene Synchrotronstrahlungsquellen. Für ROSY ist die Variante eines 5 T supraleitenden Ablenkmagneten (ROSY-WLS) zusätzlich berechnet.



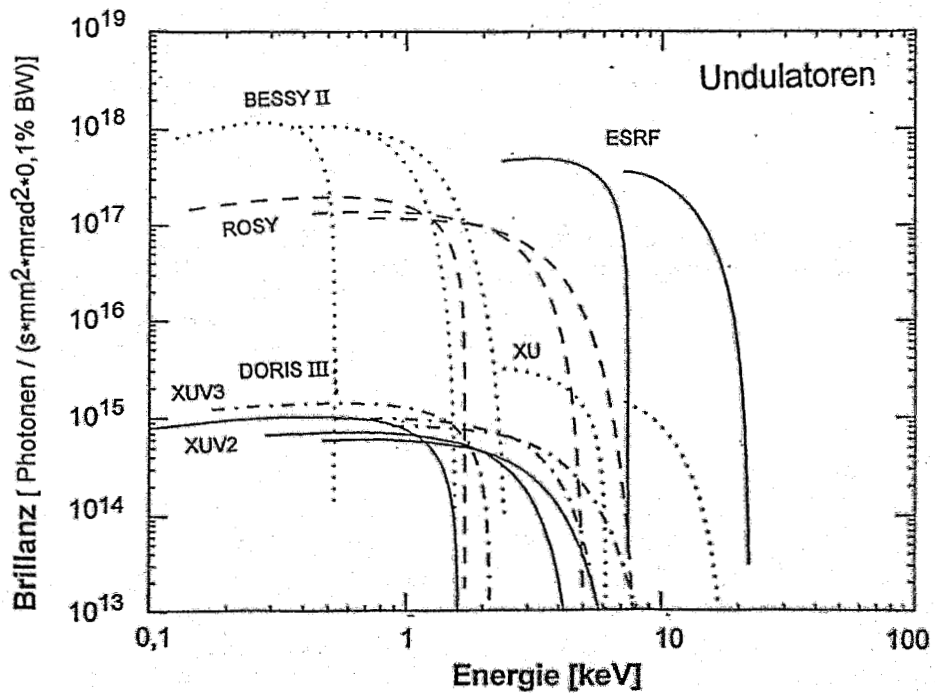
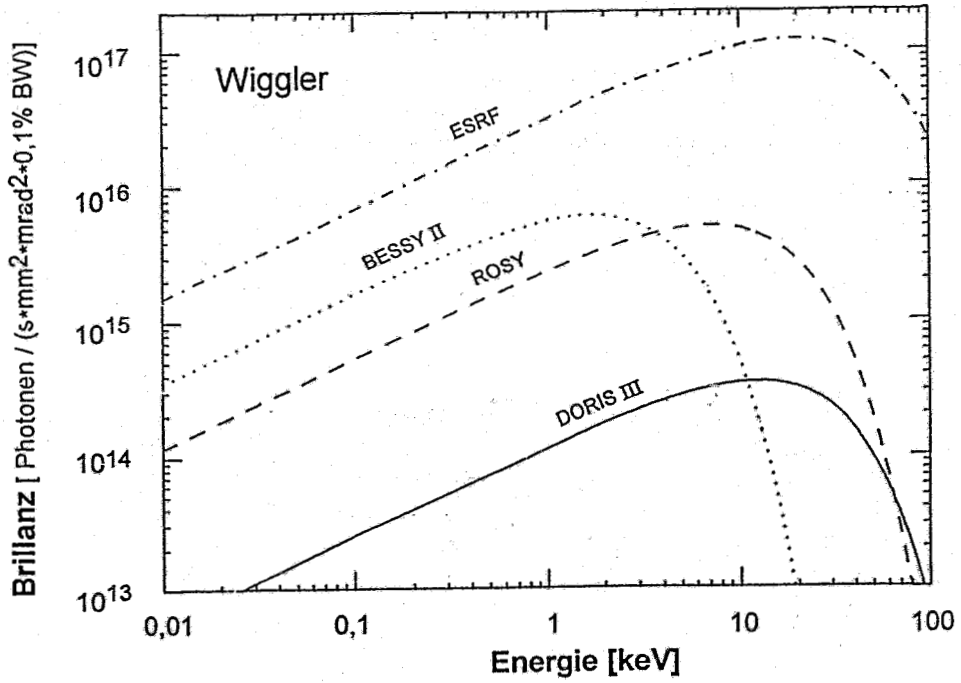


Abb. 2.7: Brillanz der Synchrotronstrahlung aus Wiggler und Undulatoren berechnet für verschiedene Synchrotronstrahlungsquellen.

Ein wesentliches Charakteristikum der Synchrotronstrahlung ist die gute natürliche Kollimation der Strahlung in Vorwärtsrichtung. Der Grad der Kollimation ist u.a. abhängig von der Energie der Strahlung, dem Bahnradius und der Energie der Elektronen. Der relative Verlauf der azimuthalen Verteilung der Synchrotronstrahlung von ROSY ist in Abb. 2.8 wiedergegeben. Bei der kritischen Energie der Strahlung von 8,4 keV beträgt die Halbwertsbreite des Öffnungswinkels der Strahlungskeule nur 0,28 mrad.

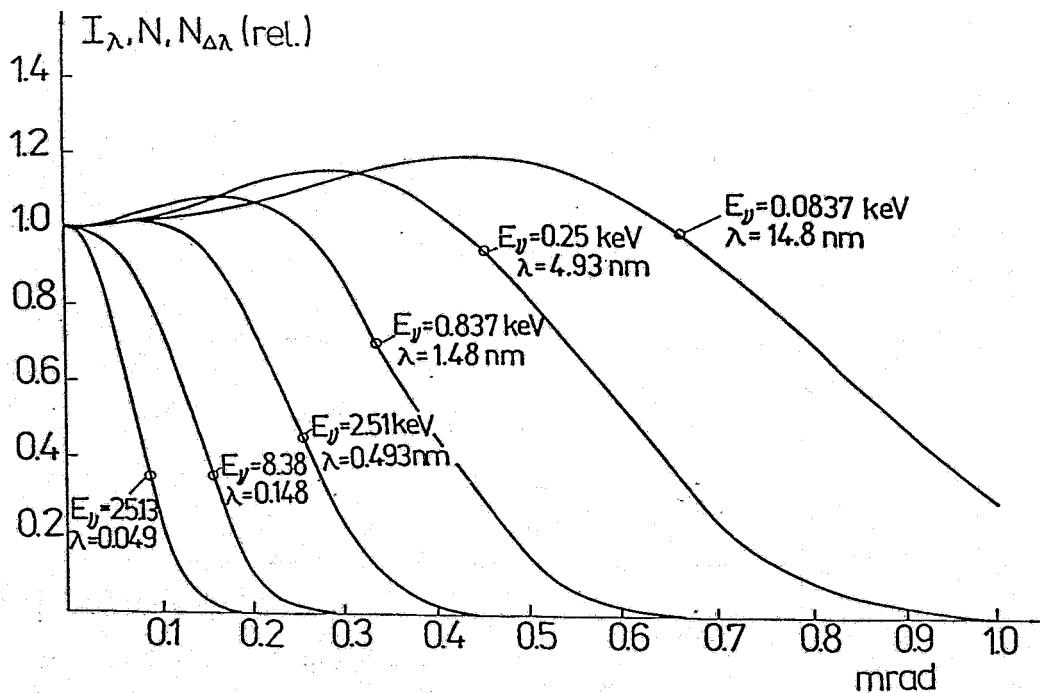


Abb. 2.8: Relative azimuthale Verteilung der Synchrotronstrahlung aus ROSY für verschiedene Energien der Strahlung.

### 3 Anforderungen an die Instrumentierung von ROSY

In dem Projektvorschlag für ROSY [RO 92] wurde eine Reihe von Instrumenten vorgeschlagen, die mit Blick auf die Materialforschung ausgewählt wurden. Die Diskussionen mit den potentiellen Nutzern hat gezeigt, daß die Auswahl der Instrumente / Methoden im wesentlichen den Erwartungen der Nutzer entsprach. Nach den Treffen mit potentiellen Nutzern von ROSY wurden diese gebeten Fragen zu ihren Nutzungsinteressen zu beantworten. Die Zusammenstellung der Antworten ist im Anhang I.C zu finden. In Tabelle 3.1 sind die Institutionen vermerkt, die ihre Vorstellungen geäußert haben.

Tabelle 3.1: *Einrichtungen der Materialforschung in Sachsen mit Interesse am Einsatz von Synchrotronstrahlung*  
(Die Abkürzungen der Institutionen werden in weiteren Tabellen verwendet.)

#### A) Universitäten

1. Technische Universität Dresden	TUD	
1.1. Institut für Kristallographie und Festkörperphysik		Kr
1.2. Institut für Anorganische Chemie		Ch
1.3. Fakultät Maschinenwesen, Institut für Werkstoffwissenschaft		WW
2. Universität Leipzig	UL	
2.1. Fachbereich Chemie, AG Elektronen- und Röntgenspektroskopie		E+R
2.2. Fachbereich Chemie, Institut für Kristallographie		Kr
2.3. Fachbereich Physik, Abt. Nukleare Festkörperphysik		NFKP
3. Technische Universität - Bergakademie Freiberg	BAF	
4. Technische Universität Chemnitz-Zwickau	TUC	

#### B) Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen

5. Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden	IFW	
6. Institut für Polymerforschung Dresden	IPF	
7. Institut für Oberflächenmodifizierung, Leipzig	IOM	
8. Forschungszentrum Rossendorf	FZR	
9. Fraunhofer-Einrichtungen	FhI	
9.1. FhE für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe, Dresden		
9.2. FhE für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik, Dresden		
9.3. FhE für Oberflächen- und Schichttechnologie, Dresden		

Die Informationen aus den vorliegenden Stellungnahmen der Institutionen wurde in Tabelle 3.2 zu einer Zusammenstellung über die mögliche Instrumentierung der Strahlrohre von ROSY komprimiert. Nicht berücksichtigt wurden dabei vorerst die im Anhang I.C enthaltenen Interessenbekundungen aus Polen und Tschechien. Zu jeder Methode / jedem Instrument sind die stark interessierten Nutzer angegeben.

Tabelle 3.2: *Vorgeschlagene Instrumentierung für ROSY mit Angabe der Institutionen, die ein starkes Interesse an der Nutzung bestimmter Methoden / Instrumente geäußert haben. Der Schlüssel für die Abkürzungen der Institute sind Tab. 3.1 zu entnehmen.*

<b>Methode / Instrument</b>	<b>Nutzer</b>
<b>Pulverdiffraktometrie (PD)</b> (mit Optionen anomale Streuung, orts- und zeitaufgelöst) Standard  hohe Auflösung ungeordnet/nichtkristallin mit energiedispersivem Detektor	TUD WW, UL Kr, IPF, Fhl, FZR TUD Kr, BAF, IFW TUC, IFW, IPF, FZR TUC
<b>Einkristalldiffraktometrie (EKD)</b> (incl. diffuse Streuung)	TUD Kr, BAF
<b>Laue-Diffraktion mit Bildplatte (LD)</b>	TUD Kr
<b>Kleinwinkelstreuung (KWS)</b>	TUC, IPF, Fhl, FZR
<b>Dünnschichtdiffraktometrie und            Reflektometrie (DSD)</b> (mit Varianten anomale Str., orts- u. zeitausgelöst)	TUD Kr, BAF, TUC, IFW Fhl, FZR
<b>Eigenspannungsmessungen /            Texturanalyse (EST)</b> massiv dünne Schichten	TUD WW, BAF, IPF TUD Kr, TUC, Fhl, FZR
<b>Kossel-Technik (KT)</b>	TUD WW
<b>Röntgentopographie (RTOP)</b>	TUD WW, (FZR)
<b>Röntgentomographie (TOM)</b>	TUD WW, TUC
<b>Röntgen-TEM (RTEM)</b>	
<b>Mößbauerspektroskopie (MB)</b>	

Tabelle 3.2: (Fortsetzung)

<i>Method</i> / <i>Instrument</i>	<i>Nutzer</i>
<b>EXAFS</b> (mit Optionen Polarisation, Fluoreszenz)	TUD Kr, TUD Ch, TUC, UL NFKP, UL E+R, BAF, TUC, IFW, FZR
<b>XANES</b>	TUD Ch, UL E+R, TUC
<b>XAS</b> für Aktiniden	FZR
<b>Elektronenspektroskopie (XPS, AES)</b>	UL E+R

Eine wesentliche Frage an die Nutzer war auch, inwieweit sie eigene Leistungen bei der Ausrüstung von Experimenten einbringen können. Eine grundsätzliche Bereitschaft zum Engagement beim Aufbau und Betrieb von Experimenten haben erklärt:

TU Dresden, Institut für Kristallographie: Laue-Diffraktion, EXAFS mit polarisiertem Strahl

TU Dresden, Institut für Werkstoffwissenschaft: Kossel-Technik

TU Chemnitz-Zwickau, FB Physik: Diffraktometrie an nichtkristallinen Stoffen (insbes. auch flüssigen Systemen)

Bergakademie Freiberg: Pulverdiffraktion hoher Auflösung

Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden: desgleichen

Universität Leipzig, AG Elektronen- und Röntgenspektroskopie

Elektronenspektroskopiemeßplatz

Diese Bereitschaftserklärungen sind vorbehaltlich der Möglichkeiten zur Finanzierung derartiger Experimentaufbauten abgegeben worden. Weitergehende Aussagen sind im jetzigen Stadium des Projektes nicht möglich. Das Forschungszentrum Rossendorf selbst mußte im Rahmen der ersten Phase der Ausrüstung 3-5 Meßplätze selbst aufbauen, um eine gewisse Breite der verfügbaren Methoden von Beginn an zu gewährleisten.

Die Nutzer wurden auch gebeten eine Abschätzung der benötigten Meßzeit aus heutiger Sicht vorzunehmen. Dieser Bedarf wurde zusammengerechnet und ist in Abb. 3.1 nach Instrumente geordnet dargestellt. Die Angaben sind in Tagen gemacht, um einen einheitlichen Maßstab zu erhalten. Es wird dabei unterstellt, daß die Synchrotronstrahlungsquelle dreischichtig betrieben wird.

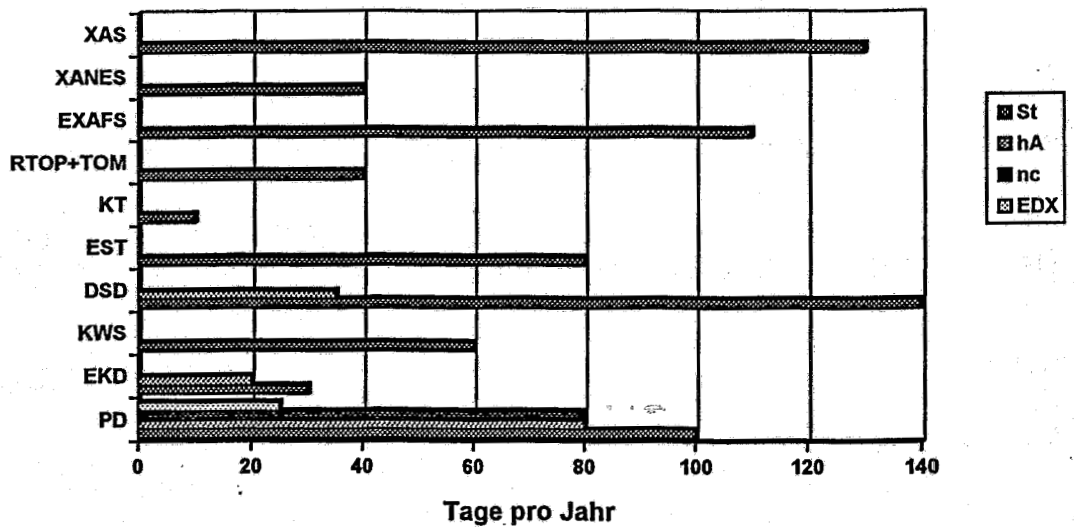


Abb. 3.1: Geschätzter Strahlzeitbedarf an einzelnen Experimenten gemäß Tabelle 3.2 nach den Nutzerangaben von Anhang I.C.  
 (St-Standard, hA-hohe Auflösung bzw. Laue-Diffraktion bzw. Reflektometrie bei DSD, nc-nichtkristallin, EDX- energiedispersiv)

Im Normalbetrieb wird von einem Meßzeitangebot von etwa 200 Tagen pro Jahr ausgegangen. Daraus folgt, daß für eine Reihe von Techniken von vorn herein 2 Meßplätze vorzusehen sind, denn die Bedarfsschätzung erfaßt nur den momentanen Stand für die Forschungseinrichtungen Sachsens. Eine Vergrößerung des Bedarfs muß in Rechnung gestellt werden. Generell soll es das Ziel sein, eine Quelle wie ROSY als nationales Labor für Synchrotronstrahlung zu organisieren, so daß ein wesentlich größerer Nutzerkreis als bisher manifestiert erwartet werden muß.

## 4 Der Standort Rossendorf

Das Forschungszentrum Rossendorf verfügt aus seiner Vorgeschichte heraus über langjährige Erfahrungen bei Betrieb und Nutzung von Forschungs- und mittelgroßgeräten. Reaktor, Zyklotron oder Tandembeschleuniger wurden nicht nur von Gruppen in Rossendorf sondern auch von Gruppen der Universitäten und anderer Forschungseinrichtungen genutzt. Neben diesen Erfahrungen bietet das Forschungszentrum Rossendorf auch Voraussetzungen einer komplexen Infrastruktur, die deutlich über die Möglichkeiten von Universitätsinstituten hinausgeht und somit adäquate Voraussetzungen für den Aufbau und Betrieb eines größeren Basisgerätes für die Forschung, wie es ROSY darstellt, bietet.

Der Standort Rossendorf verfügt auch territorial über ausreichend Freiraum, um einen Speicherring ROSY mit den zugehörigen Gebäuden aufzunehmen und auch Platz für spätere Ergänzungen oder Erweiterungen vorzuhalten. Eine kurze technische Standortbeschreibung ist in Anhang I.D zu finden.

Das Forschungszentrum Rossendorf befindet sich östlich der Stadt Dresden in einer Entfernung von etwa 15 km Luftlinie zum Stadtzentrum. Im Forschungszentrum Rossendorf gibt es 5 wissenschaftliche Institute

Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie

Institut für Radiochemie

Institut für Kern- und Hadronenphysik

Institut für Sicherheitsforschung

die in unterschiedlich starkem Maße an der Nutzung der Synchrotronstrahlung interessiert sind (siehe Abschnitt 1). Im Bereich der Materialforschung integriert sich das FZR mit seinen Aktivitäten in den Dresdner Materialforschungsverbund und pflegt hier vor allem die Ionenstrahltechniken. Mit einer Synchrotronstrahlungsquelle ROSY würde sich Rossendorf noch stärker als Strahlencentrum profilieren. Die Quelle würde für die Institute des Materialforschungsverbundes Dresden und alle anderen Einrichtungen der Region, die auf dem Gebiet der Materialforschung tätig sind, eine wesentliche Erweiterung der Möglichkeiten bedeuten.

Bei den Überlegungen für die längerfristige Gestaltung des Geländes im Forschungsstandort Rossendorf wurden auch die möglichen Bauplätze für ROSY analysiert. Abb. 4.1 zeigt den Übersichtsplan des Forschungsstandortes Rossendorf mit seinem jetzigen Bebauungszustand. Von der Gesamtfläche von 180 ha sind 6,5 ha bebaut und für eine weitere Bebauung stehen noch etwa 70 ha zur Verfügung. Dabei ist aber der südöstliche Bereich des Geländes (ober- und unterhalb der Harthteiche in Abb. 4.1) wegen hoher Bodenfeuchtigkeit für Bebauung wenig geeignet. Gebäude und Anlagen in denen mit radioaktiven Stoffen gearbeitet wird bzw. in denen aus früheren Forschungsaktivitäten noch Kernbrennstoffe vorhanden sind, befinden sich in der sogenannten "inneren Zone", für die spezielle Zugangsregelungen gelten.

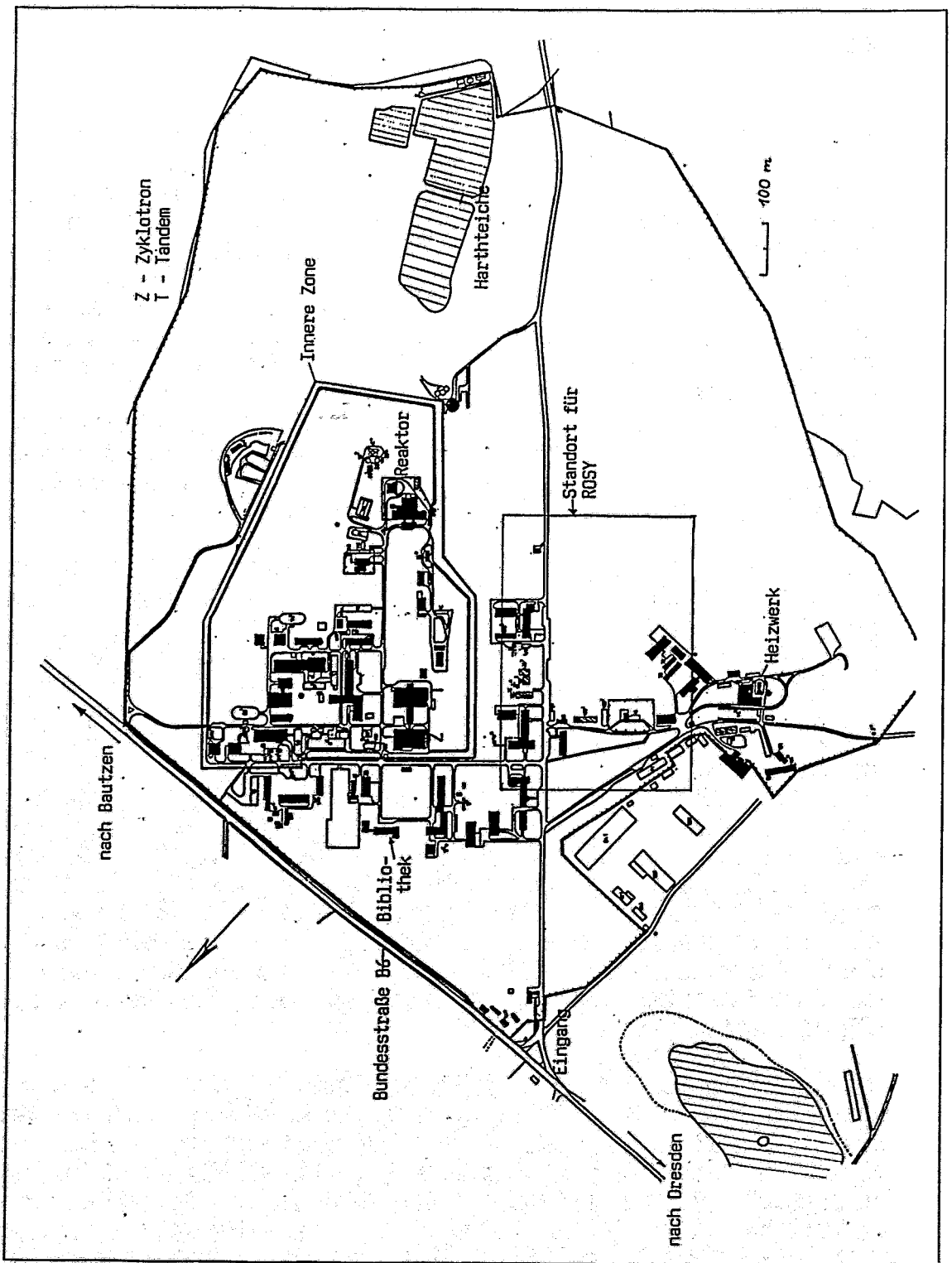


Abb. 4.1: Übersichtsplan des Geländes des Forschungsstandortes Rossendorf.  
 Der markierte Bereich ist in Abb. 4.2 detaillierter gezeigt.





Bei der Beurteilung möglicher Standorte wurden folgende Gesichtspunkte berücksichtigt:

- Die Synchrotronstrahlungsquelle soll nicht in der "inneren Zone" liegen, damit der Zugang für Fremdnutzer problemlos möglich ist.
- Der Standort soll sich an die vorhandene Bebauung anschließen, um das Gelände nicht zu "zersiedeln" und die Einbindung in die Versorgungs- und Kommunikationsnetze kostengünstig zu gestalten. Gleichzeitig soll eine spätere Erweiterung möglich sein.
- Der Baugrund sollte so beschaffen sein, daß er die Last des Gebäudes tragen kann, daß eine Langzeitstabilität gegeben ist und daß Fremderschütterungen (z. B. vom Verkehr auf der Bundesstraße 6) möglichst klein gehalten werden.

Unter diesen Gesichtspunkte und unter Berücksichtigung anderer Erweiterungsprojekte in Rossendorf wurde ein Standort südwestlich der durch das Gelände gehenden Straße B6-Dittersbach gewählt. In Abb. 4.2 ist ein entsprechender Ausschnitt des Geländeplanes von Rossendorf gezeigt. Dieser Platz liegt außerhalb der inneren Zone und kann vom Haupteingang günstig erreicht werden. Er schließt unmittelbar an das Gelände an, auf dem sich die wesentlichen Einspeisungen (Energie, Wasser) bzw. Versorgungseinrichtungen (Heizwerk) befinden. Das Gelände ist zwar hügelig, jedoch ist bei allen anderen freien Flächen ebenfalls ein (z.T. noch größerer) Höhenunterschied auszugleichen. Andererseits ist nach Südosten noch ausreichend Platz für Erweiterungen. Der Boden besteht in diesem Bereich aus Kiesen und Sanden und der Grundwasserspiegel ist bei etwa 20 Metern, so daß der Baugrund die Gebäudelast ohne weiteres aufnehmen kann.

Für die Unterbringung der Synchrotronstrahlungsquelle ist eine Rundhalle von etwa 80 m Durchmesser konzipiert. Die Räume für technische Hilfseinrichtungen und Anlagenbetrieb sind als 90°-Segment unmittelbar der Halle angeschlossen. Für Büro- und Seminarräume ist ein Anbau vorgesehen. In der Experimentierhalle stehen von der Strahlenschutzwand etwa 25 m für den Aufbau der Meßplätze zur Verfügung. Die Strahlenschutzwand befindet sich rund 13 m vom Quellpunkt der Strahlung im Speicherring. Abb. 4.3 zeigt eine Ansicht des geplanten Gebäudes. Genauere Ausführungen zum Gebäude werden im Teil II, Abschnitt 14 gemacht.

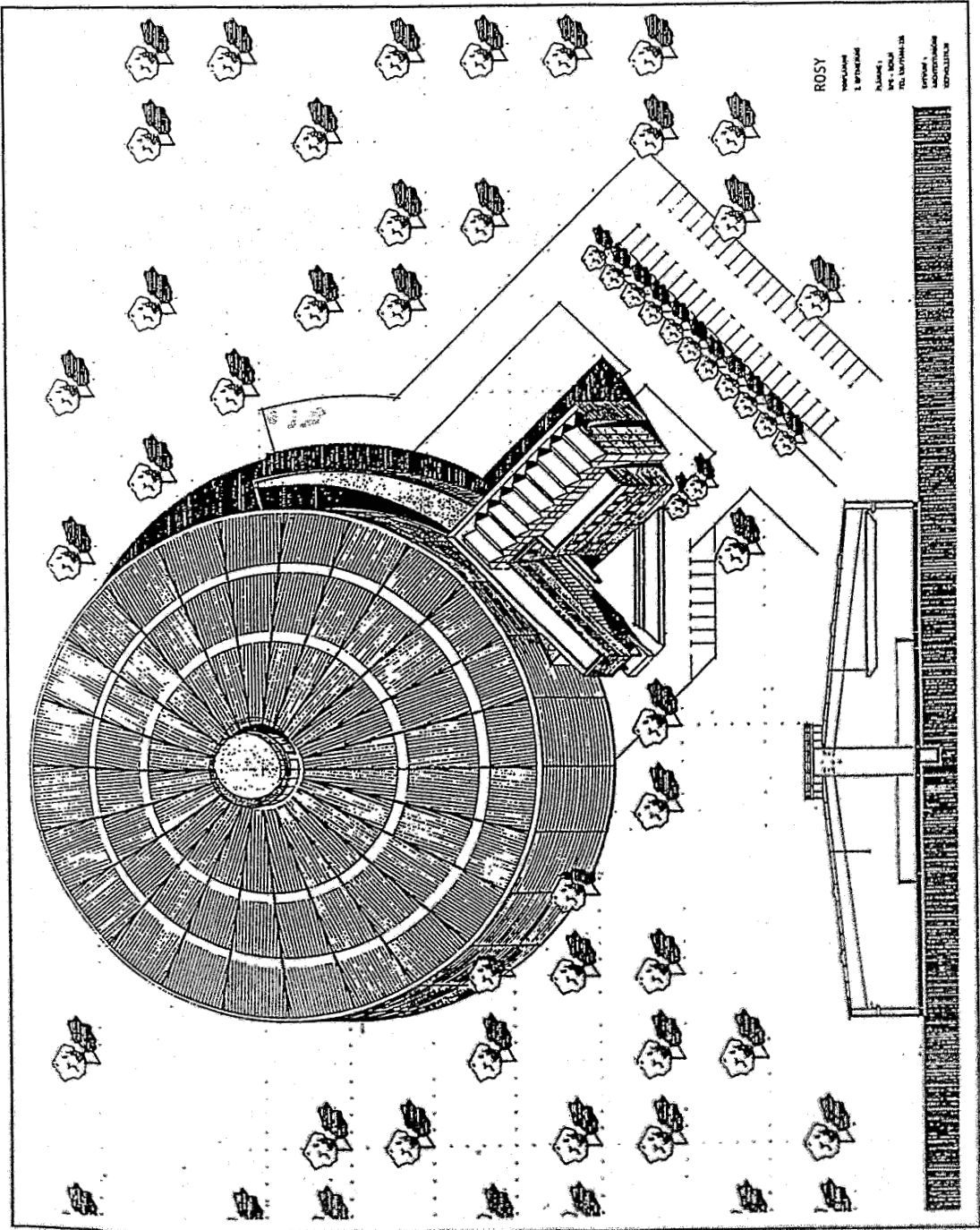


Abb. 4.3: Architektenentwurf der Halle für den Speicherring ROSY

### Referenzen

- [Gü 93] Die Rechnungen zu Fluß und Brillanz der einzelnen Quellen wurde freundlicherweise von Herrn Dr. P. Gürtler, HASYLAB bei DESY ausgeführt.
- [RO 92] ROSY - Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle, Vorschlag für die Errichtung einer Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung,  
verantwortliche Bearbeiter: W. Matz, D. Einfeld,  
FZR 92-10, Rossendorf, Juni 1992
- [Wr 92] A. Wrulich (Sincrotrone Trieste)  
Seminarvortrag im FZR, 2. 12. 92

## Anhang I.A: Übersicht über die Synchrotronstrahlungsquellen weltweit

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

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

Etwas detailliertere Angaben findet man noch in I.H. Munro, C.A., Boardman, and J.C. Fuggle, "World Compendium of Synchrotron Radiation Facilities", The European Synchrotron Radiation Society, c/o Bâtiment 209 D, LURE, Université Paris Sud, 91405 Orsay, France.

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) ACO(LURE)	1.8 0.54	Dedicated **
GERMANY Bonn Hamburg	ELSA (Bonn Univ.) DORIS II (HASYLAB) PETRA (HASYLAB)	3.5 3.5 - 5.5 6 - 13	Partly Dedicated Partly Dedicated Planned Use
ITALY Frascati	ADONE (LNF)	1.5	Partly Dedicated
JAPAN Sendai Tsukuba	TSSR (Tohoku Univ.) Accumulator Ring (KEK) Tristan Main Ring (KEK)	1.5 6 6 - 30	Proposed/Part. Ded. Partly Dedicated Planned Use
NETHERLANDS Amsterdam Eindhoven	AmPS EUTERPE (Tech. Univ. Eind.)	0.9 0.4	Planned Use* Planned Use*
USA Gaithersburg, MD Ithaca, NY Stanford, CA Stoughton, WI	SURF II (NIST) CESR (CHESS) SPEAR (SSRL) PEP(SLAC/SSRL) Tantalus (SRC)	0.28 5.5 3 - 3.5 5 - 15 0.24	Dedicated Partly Dedicated Dedicated ** **
USSR Novosibirsk	VEPP-2M (Inst.Nucl.Phys.) VEPP-3 (Inst.Nucl.Phys.) VEPP-4 (Inst.Nucl.Phys.)	0.7 2.2 5 - 7	Partly Dedicated Partly Dedicated 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	NLS I (Brookhaven Lab.)	0.75	Dedicated
	NLS 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 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.

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 ( $\leq 40$  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 SuperACO (LURE)	6 0.8	Dedicated* Operating
GERMANY Dortmund Berlin	DELTA (Dortmund Univ.) BESSY II	1.5 1.5 - 2	Dedicated/FEL Use* Proposed/Dedicated
INDIA Indore	INDUS-II (Ctr.Adv.Tech.)	2	Proposed/Dedicated
ITALY Trieste	ELETTRA (Synch.Trieste)	1.5 - 2	Dedicated*
JAPAN Hiroshima Kyushu Nishi Harima	HISOR (Hiroshima Univ.) SOR (Kyushu Univ.) SPRING-8 (Sci.Tech.Agency)	1.5 1.5 8	Proposed/Dedicated Proposed/Dedicated Dedicated*
KOREA Pohang	Pohang Light Source	2	Dedicated*
SWEDEN LUND	MAX II (Univ. of Lund)	1.5	Dedicated*
USA Argonne,IL Berkeley,CA	APS (ANL) ALS (LBL)	7 1.5	Dedicated* Dedicated*
USSR Kharkov	HP-2000	2.0	Dedicated*

\* In construction as of 5/91

## **Synchrotronstrahlung und Materialwissenschaft**

### Inhaltsübersicht

	Seite
1. Einführung	2
2. Grundlegende Prinzipien von Synchrotronstrahlungsexperimenten für die Materialforschung	3
2.1. Beugungsmethoden	3
2.2. Absorptionsmethoden	5
3. Untersuchungsmethoden und ihre Aussagemöglichkeiten	8
3.1. Einkristalluntersuchungen	8
3.2. Pulverdiffraktometrie mit Synchrotronstrahlung	11
3.3. Zeitaufgelöste Experimente mit Synchrotronstrahlung	14
3.4. Strukturanalyse an nichtkristallinen Materialien	15
3.5. Untersuchung von Oberflächen und dünnen Schichten	18
3.6. Realstrukturanalyse	22
3.7. Spannungen und Deformationen in Oberflächenschichten	24
3.8. Kleinwinkelstreuung	26
3.9. Mikrotomographie	28
3.10. EXAFS- Spektroskopie	31
Literatur	35



## 1. Einführung

Moderne Werkstoffforschung erfordert umfassende Kenntnisse über den geometrisch-strukturellen und den elektronischen Aufbau der Materialien sowie über die Zusammenhänge zwischen Darstellung und den physikalischen Eigenschaften. Die interessierenden Werkstoffe werden in ihrem strukturellen, chemischen und elektronischen Aufbau immer komplizierter. So sind heterogene Systeme aus Komponenten mit niedriger Kristallsymmetrie, amorphe Phasen, nanokristalline Materialien, dünne Schichten, Grenzflächen und Schichtsysteme neben den herkömmlichen kristallinen Systemen Gegenstand der Grundlagenforschung zur Materialentwicklung.

In diesem Prozeß werden immer höhere Anforderungen an die analytischen Methoden gestellt. Einerseits geht es um eine detailliertere Beschreibung der atomaren und elektronischen Struktur, insbesondere der Abweichungen von der "Idealstruktur". Andererseits möchte man die Strukturentwicklung bei Darstellungs- oder Umwandlungsprozessen beobachten. Generelles Ziel ist die Vertiefung des Verständnisses von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen.

Da wesentliche Methoden der Strukturuntersuchung auf der Nutzung von Röntgenstrahlung beruhen, kann die Synchrotronstrahlung wegen ihrer einzigartigen Eigenschaften

- kontinuierliches Spektrum elektromagnetischer Strahlung im Energiebereich von Infrarot bis zu harter Röntgenstrahlung mit sehr hoher Intensität
  - geringe Strahldivergenzen bzw. hohe natürliche Kollimation
  - hohe Leuchtdichte der Quelle
  - genaue Berechenbarkeit der Strahlungscharakteristik
  - lineare Polarisierung in der Ebene
  - Zeitstruktur (gepulste Quelle mit sehr kurzen Lichtblitzen von 100 ps)
- ganz wesentliche Beiträge zur Erreichung dieser Zielstellungen liefern.

In den letzten Jahren sind weltweit neue Synchrotronstrahlungsquellen gebaut oder deren Bau in Angriff genommen worden, die ausschließlich unter dem Gesichtspunkt der Nutzung der Synchrotronstrahlung konzipiert wurden (dedicated sources), nachdem ursprünglich die Synchrotronstrahlungsnutzer parasitär an Beschleunigern für Kern- oder Hochenergiephysik arbeiteten. Beim Entwurf der dedizierten Maschinen der 3. Generation spielen auch qualitative Verbesserungen der Emittanz (Erhöhung der Brillanz) eine wesentliche Rolle. Eine weitere Steigerung der Quellintensität moderner Anlagen um Größenordnungen konnte durch den Einbau spezieller Magnetstrukturen (Wiggler, Undulatoren) erreicht werden.

Die einzigartigen Eigenschaften der Synchrotronstrahlung machen ihre Anwendung für viele Bereiche von Physik, Chemie, Biologie, Medizin aber zunehmend auch für Bereiche der angewandten Forschung wie die Materialforschung oder Technik interessant. In diesem Beitrag sollen die für die Materialforschung relevanten wesentlichen Methoden vorgestellt und illustriert werden. Eine vollständige Behandlung aller Möglichkeiten soll und kann dabei nicht erfolgen.

## 2. Grundlegende Prinzipien von Synchrotronstrahlungsexperimenten für die Materialforschung

In diesem Abschnitt sollen grundlegende physikalische Prinzipien des Studiums kondensierter Phasen mit Synchrotronstrahlung erläutert werden. Auf diese Aussagen wird dann im nachfolgenden Abschnitt 3. zurückgegriffen. Die Darstellung ist auf den Energiebereich der Röntgenstrahlung beschränkt.

Bei der Untersuchung des atomar-geometrischen und des chemischen Aufbaus von Materialien mit Synchrotronstrahlung kann man eine Einteilung in 2 große Methodengruppen vornehmen: in die Beugungsmethoden und die Absorptionsmethoden. Diese beiden Gruppen werden hier besprochen.

### 2.1. Beugungsmethoden

Fällt ein Röntgenstrahl auf ein Ensemble von Atomen, so erfolgt die Streuung des Strahles individuell an den Elektronenhüllen der einzelnen Atome. Das Streuvermögen des Einzelatoms wird durch den Atomformfaktor  $f(Q)$  beschrieben:

$$f(Q) = f_0(Q) + f'(Q) + if''(Q)$$

Die Variable  $Q (= 4\pi\sin\theta/\lambda)$  ist der Betrag des Streuvektors und enthält Streuwinkel  $2\theta$  sowie Wellenlänge der Strahlung  $\lambda$ . Im Bereich weitab von den Absorptionskanten der einzelnen Elemente spielt nur der Beitrag  $f_0(Q)$  eine Rolle. Auf das Verhalten in der Nähe der Absorptionskante wird weiter unten eingegangen. Der Atomformfaktor ist eine auf 1 (oder die Ordnungszahl  $Z$ ) normierte Größe und fällt mit  $Q$  etwa wie eine Glockenkurve ab.

#### *Diffraction*

Für die Analyse der Struktur wird die konstruktive Interferenz der von den einzelnen Atomen gestreuten Röntgenstrahlung ausgenutzt. Durch die dreidimensionale Periodizität des Kristallgitters und die sehr große Zahl von Elementarzellen, die einen makroskopischen Kristalliten bilden, werden nur an wenigen Raumpunkten Interferenzmaxima erzeugt, die dafür aber sehr scharf sind. Die Lage dieser Maxima wird Punkten des sogenannten reziproken Gitters eines Kristalls zugeordnet (Vektoren des reziproken Gitters  $\tau$ ). Der Zusammenhang zwischen den Experimentparameter (Streuwinkel, Wellenlänge) und den Kristallparametern (Vektor des reziproken Gitters, Netzebenenabstand) wird durch die LAUE-Gleichungen bei Einkristallen und die BRAGGSche Gleichung bei Polykristallen hergestellt. Letztere beispielsweise lautet:

$$n\lambda = 2d \sin\theta.$$

Auskunft über die Atomanordnung im untersuchten Kristall gewinnt man aus den Intensitäten der Interferenzmaxima, wobei die wesentliche Größe der Strukturfaktor  $F(\tau)$  ist. Die Abhängigkeit von  $\tau$  soll anzeigen, daß  $F$  nur an diesen diskreten Punkten von Null verschieden ist.

$$F(\tau) = \sum f_i(Q=\tau) \exp[-2\pi i \mathbf{r}_i \cdot \tau] = \sum f_i \cdot \exp[-2\pi i(hx+ky+lz)]$$

$\mathbf{r}_i$  ist dabei der Gittervektor des Atoms  $i$  in der Elementarzelle mit den Koordinaten  $(x \ y \ z)$  und  $\tau$  der Vektor des reziproken Gitters mit den Komponenten  $(h \ k \ l)$ , die auch als MILLERSche Indizes bezeichnet werden. Bisher wurde unterstellt, daß die zu untersuchenden Proben kristallin und damit durch eine langreichweitige Periodizität gekennzeichnet sind. Bei stark gestörten Kristallen oder nichtkristallinen Materialien geht diese langreichweitige Periodizität stark oder vollständig verloren. Infolgedessen sind die Intensitätsmaxima des Beugungsbildes nicht mehr scharf sondern werden zunehmend verbreitert bis im nichtkristallinen Fall nur noch eine schwach strukturierte Intensitätsverteilung in Abhängigkeit von  $\sin\theta/\lambda$  gemessen werden kann. In der Auswertung kann man in diesem Grenzfall nicht mehr die einzelnen Atompositionen, sondern nur noch Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Atomorten angeben.

### *Kleinwinkelstreuung*

Ein gewisser Spezialfall der Beugungsmethoden ist die Kleinwinkelstreuung. Von dieser spricht man, wenn der Betrag des Streuvektors  $Q < 5 \text{ nm}^{-1}$  ist. In diesem Fall wird durch die Streustrahlung nicht mehr die atomar-geometrische Struktur im Detail abgebildet, sondern das mittlere Streuvermögen von Bereichen mit einer Ausdehnung zwischen 20 nm und 100  $\mu\text{m}$ . Voraussetzung für die Abbildung sind deutliche Differenzen im Streuvermögen zwischen den angesprochenen Bereichen und dem Rest des zu untersuchenden Materials. Die Kleinwinkelstreuung ist damit eine Methode zum Studium von Inhomogenitäten in der Probe, wobei die Inhomogenitäten unter günstigen Umständen nach Größe und Form charakterisiert werden können.

### *anomale Dispersion*

Es wurde bereits erwähnt, daß der Atomformfaktor  $f(Q)$  in der Nähe der Absorptionskanten der Elemente Besonderheiten aufweist. In diesem Bereich werden nämlich die Größen  $f'$  und  $f''$  deutlich von Null verschieden und  $f'$  ändert sich drastisch (siehe Abb. 1). Die energetische Lage der Absorptionskante ist

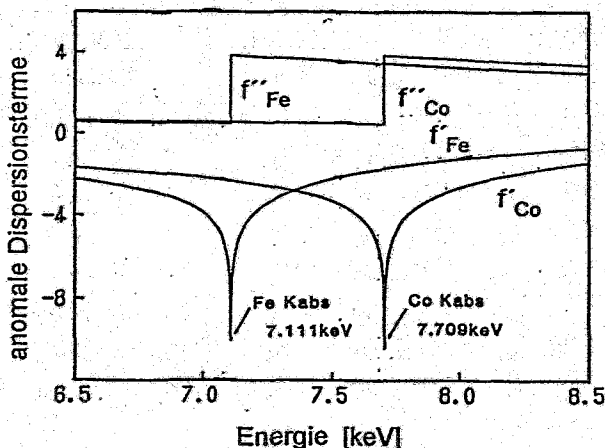


Abb. 1:  
Energieabhängigkeit der anomalen Dispersionsterme der Atomformfaktoren für Eisen und Kobalt

für die einzelnen Elemente eine charakteristische Größe. Die kontinuierliche Durchstimrbarkeit der Energie (oder Wellenlänge) verbunden mit der erreichbaren Schärfe der Energiefestlegung im Falle von Synchrotronstrahlung gestatten es, die Strahlungsenergie beim Experiment an verschiedenen Punkten der Kurve  $f'(E)$  bzw.  $f''(E)$  zu wählen. Damit wird das Streuvermögen der ausgewählten Atomsorte und ihr Beitrag zur Gesamtstreuintensität  $F(\tau)$  verändert. Die Nutzung der anomalen Dispersion ist also ein Kontrastvariationsverfahren. Vom Prinzip her kann man diesen Effekt auch an Laborröntgenanlagen nutzen, muß aber dazu mit dem Bremspektrum arbeiten. Die dabei verwertbaren nur geringen Intensitäten begrenzen die Anwendungsmöglichkeiten sehr stark, so daß die Nutzung der anomalen Dispersion eine wesentliche Domäne der Synchrotronstrahlung ist.

## 2.2. Absorptionsmethoden

In der Energieabhängigkeit der Absorption von Röntgenstrahlung durch Atome gibt es bei bestimmten Energien Sprünge (Absorptionskanten), die durch die Photoionisation innerer Elektronenschalen bedingt sind. Während bei der Arbeit mit Laborröntgenquellen diese Absorptionskanten als mehr oder weniger glatt erscheinen (Abb. 2a), findet man bei der genaueren Untersuchung mit Synchrotronstrahlung eine Strukturierung der Kante selbst und des Bereiches oberhalb der Absorptionskante (Abb. 2b). Die Strukturierung des unmittelbaren Kantenbereiches bezeichnet man mit XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) während die Struktur oberhalb der Kante mit dem Namen EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) belegt wurde. Die XANES-Region umfaßt etwa den Bereich bis 50 eV oberhalb der Photoionisationsschwelle. Die EXAFS-Region entsprechend den Bereich von 50 bis 200 eV.

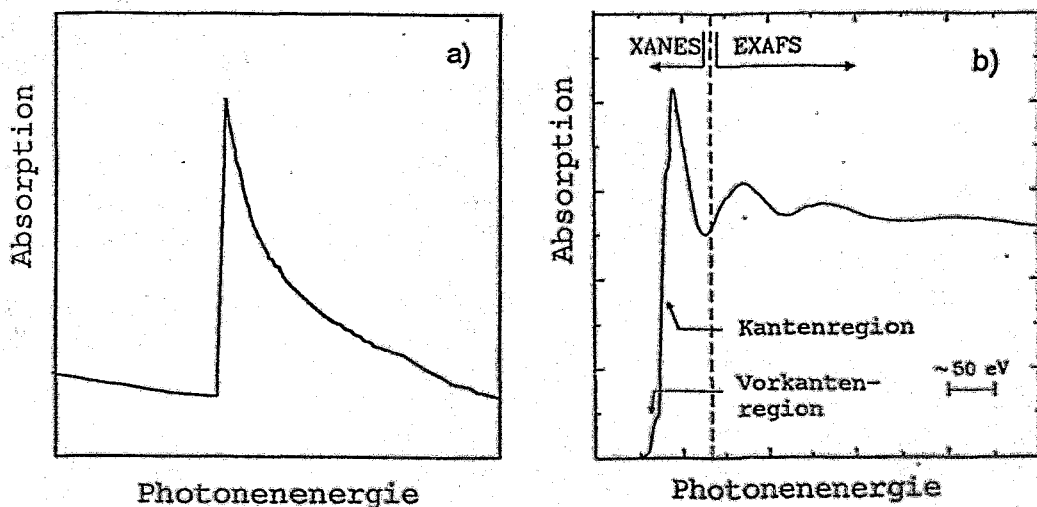


Abb. 2: Schematische Darstellung der Röntgenabsorptionskante von Atomen.  
 a) Erscheinungsbild bei Laborröntgenquellen mit kaum sichtbarer Strukturierung.  
 b) Feinstruktur des Kantenbereiches wie sie mit Synchrotronstrahlung leicht nachweisbar ist.

Der kantennahe Bereich und die Kantenregion selbst enthalten Informationen über Bindungsenergien, Valenzzustände des Atoms oder unbesetzte lokalisierte Elektronenzustände. Die Lage der Absorptionskante variiert mit der Valenz, wobei mit zunehmender Wertigkeit eine Verschiebung zu höheren Energien eintritt. Abb. 3 zeigt die K-Kante von Titan bei verschiedener Wertigkeit. Die Kante von  $Ti^{4+}$  liegt ca. 8 eV oberhalb der Kante von  $Ti^{2+}$  und ca. 12 eV oberhalb der Kante von Titan in Titanmetall.

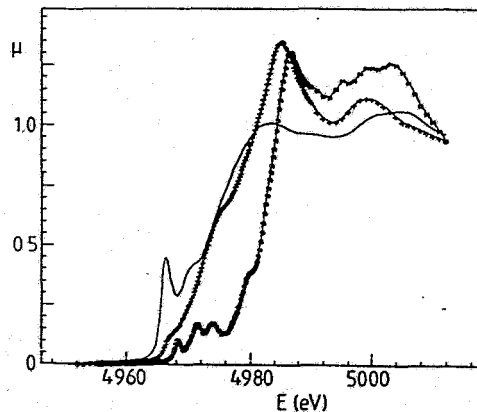


Abb. 3:  
K-Röntgenabsorptionskante  
von Titan in Ti-Metall (-), in TiO (+)  
und TiO<sub>2</sub> (\*) [Le 87].

Der EXAFS-Bereich der Absorptionskante liefert Informationen über die Umgebung des Atoms an dessen Kante gemessen wird, d.h. er macht die Nahordnung zugänglich. Damit können nicht nur kristalline Festkörper, sondern auch amorphe oder flüssige Proben und prinzipiell auch Gase untersucht werden. Es handelt sich vom Grundtyp um ein relativ einfaches Transmissionsexperiment. Die wesentliche Genauigkeitsforderung an die experimentelle Ausrüstung ist die schrittweise Variation der Energie der Primärstrahlung im Kantenbereich, um die Oszillationen abzutasten. Da das beim Stand der Technik gut realisierbar ist, ist EXAFS eine sehr extensiv eingesetzte Methode bei der Untersuchung von Materialien mit Synchrotronstrahlung. Mit dieser Meßstrategie ist EXAFS auch eine ideal dem kontinuierlichen Spektrum des Synchrotronstrahlung angepaßte Methode. Ein wesentlicher Aspekt ist die *elementspezifische* Erfassung der Nahordnung, da immer die Umgebung des Atoms analysiert wird an dessen Absorptionskante die Messung erfolgt.

Abb. 4 stellt schematisch die Auswertungsschritte eines entsprechenden Experimentes dar. Vom gemessenen Absorptionskoeffizienten  $\mu(E)$  wird der glatte Anteil  $\mu_0(E)$  abgezogen, dann noch auf  $\mu_0(E)$  normiert und in Wellenzahleinheiten  $k$  umgerechnet. Als Zwischenergebnis erhält man die in Abb. 4b dargestellte Funktion  $\chi(k)$ . Durch Fouriertransformation bekommt man schließlich die radiale Verteilungsfunktion  $F(r)$  von Abb. 4c, deren Maxima Nachbarschalen des Bezugsatoms zuordenbar sind. Die Fläche unter den Maxima gibt Auskunft über Koordinationszahlen, d.h. die Anzahl der Nachbaratome in einer bestimmten Schale.

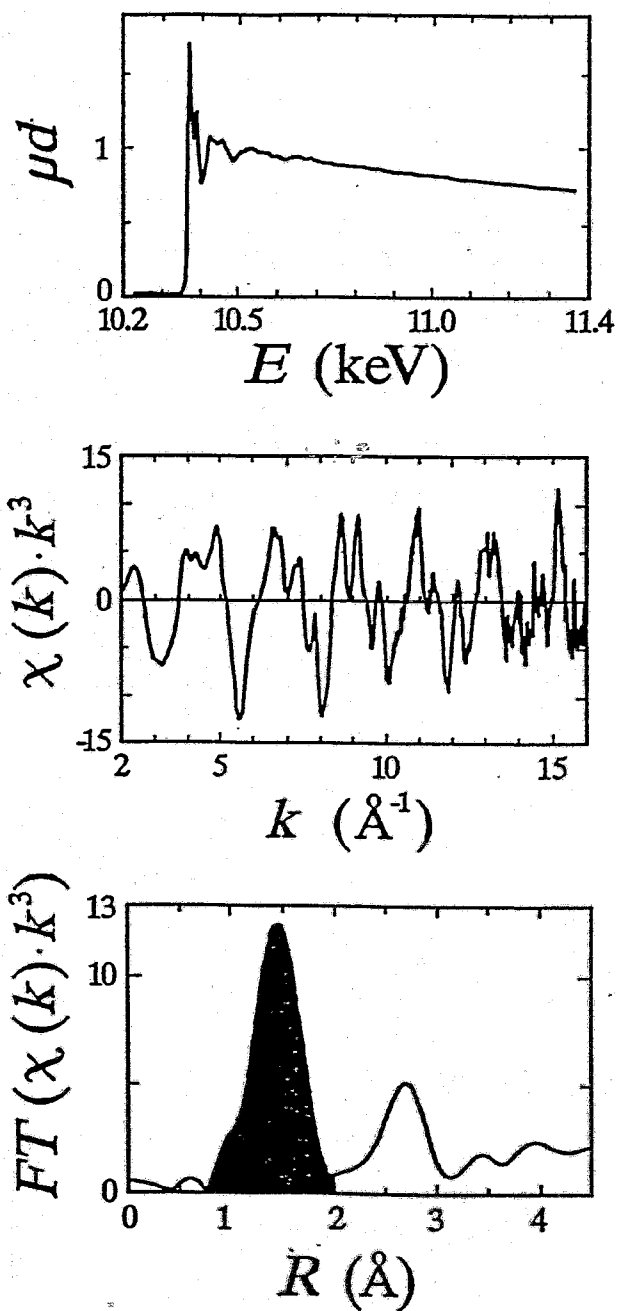


Abb. 4:  
 Schematische Darstellung der Prinzipien einer EXAFS-Messung. Vom gemessenen Absorptionsspektrum (oben) wird die mittlere Absorption subtrahiert und es wird in  $k$ -Werte umgerechnet. Die daraus entstehende Funktion  $\chi(k)$  (Mitte) wird gewichtet und fourier-transformiert. Die Fläche unter den Maxima in der Radialverteilungsfunktion (unten) ist proportional der Zahl der Nachbaratome.

### 3. Untersuchungsmethoden und ihre Aussagemöglichkeiten

#### 3.1. Einkristalluntersuchungen

Verglichen mit der herkömmlichen Röntgenstrahlung bietet die Synchrotronstrahlung aufgrund ihrer obengenannten markanten Eigenschaften für die Untersuchung von Einkristallstrukturen oft entscheidende Vorteile. Die am Experiment verfügbare Intensität ( $10^{11}$  Photonen/s $\cdot$ mm $^2$  für  $\lambda=0,1-0,15$  nm am Strahlausgang X-13B der NSLS /National Synchrotron Light Source/ in Brookhaven) übersteigt die an Drehanoden erhältlichen Photonenflüsse ( $10^7 - 10^9$  Photonen/s/mm $^2$ ) um mehrere Größenordnungen. Durch die hohe natürliche Kollimation ergibt sich zudem eine Verbesserung des Effekt-Untergrund Verhältnisses. Dadurch ist es möglich, die Feinstrukturen der Diffraktion aufzulösen.

So können beispielsweise die Effekte der Mehrfachbeugung und der dynamischen Wechselwirkung an perfekten Kristallen nachgewiesen werden. Abb. 5 zeigt den Effekt einer Mehrfachbeugung am 'verbotenen' Si(222)-Reflex, gemessen bei Drehung um den (222)-Beugungsvektor [Kv 88]. Die charakteristische Asymmetrie des Peaks [Po 79], die durch kohärente dynamischen Wechselwirkung in der Röntgen-Mehrfachbeugung verursacht wird, ist im Detail hervorgehoben.

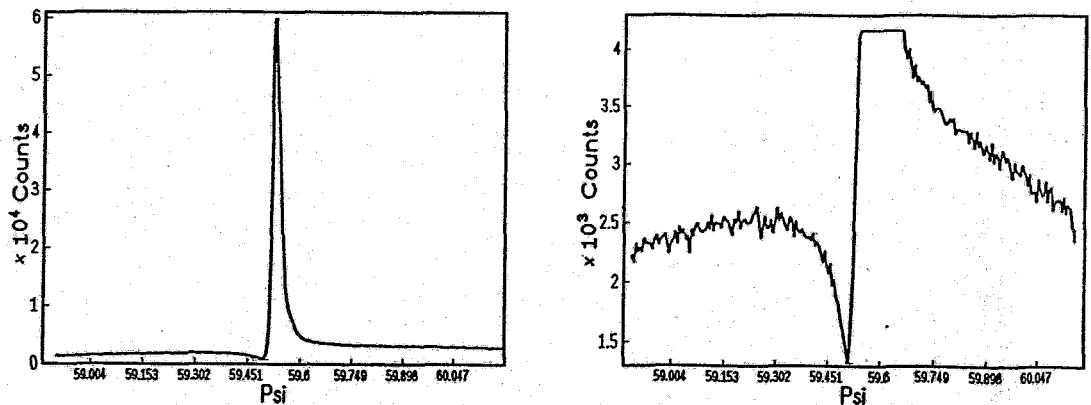


Abb. 5: Si (222) Mehrfachdiffraktions-Peak und Detail der dynamischen Dreistrahl-Wechselwirkung [Kv 88]

Die Kollimation und die große Strahlintensität machen es möglich, extrem kleine Kristalle zu untersuchen, winzige Änderungen der Zellendimension genau aufzulösen und statistisch signifikante Daten in kurzen Zeitintervallen zu erhalten. Abb. 6 illustriert dieses am Beispiel der Untersuchung komplexer Zeolitstrukturen an Mikrokristallen mit Kantenlängen  $< 50 \mu\text{m}$  [Kv 88]. Die Abbildung zeigt den (10 0 0)-Reflex eines monoklinen ZSM-5 Zeolitkristalls ( $V_{\text{cell}}=5,4 \text{ nm}^3$ ,  $\lambda_d=0,151 \text{ nm}$ ) mit den ungefähren Ausmaßen  $50 \times 10 \times 5 \mu\text{m}^3$ . Die beobachtete Breite der Braggpeaks der zwei Kristallite ist  $0,015^\circ$  (FWHM) bei einer räumlichen Separation von  $0,03^\circ$ . Die Zählraten sind mehr als  $10^4$  cps bei einem Effekt-Untergrund Verhältnis  $> 130$ . Es zeigt sich, daß somit

signifikante Daten von Einkristallen erhältlich sind deren Kantenlängen nur 1-10  $\mu\text{m}$  betragen. So konnten am HASYLAB Strukturverfeinerungen z.B. an einem  $\text{CaF}_2$ -Mikrokristall mit einem Volumen von nur  $36 \mu\text{m}^3$  [Ba 85] bzw. sogar von nur  $2,2 \mu\text{m}^3$  [Ri 88] vorgenommen werden.

Die Untersuchung sehr kleiner Einkristalle hat zudem den großen Vorteil, daß die für genaue Intensitätsmessungen erforderlichen und schwierig zu erfassenden Extinktionskorrekturen hier entfallen können.

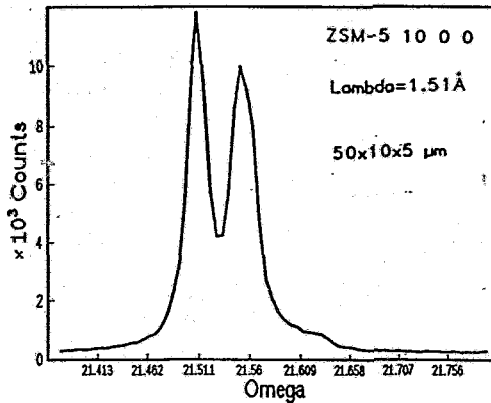


Abb.6: Diffraktionsprofil des (10 0 0)-Reflexes eines verzwilligten Mikrokristalls von Zeolit ZSM-5

Ein weiteres Beispiel der Ausnutzung von Intensität und Auflösung ist die Untersuchung von  $\text{LiNbO}_3$  im elektrischen Feld [Kv 88]. Die experimentelle Anordnung ist in Abb. 7 skizziert. Hier werden am Braggpeak FWHM-Werte von  $0,007^\circ$  beobachtet, die es gestatten, Änderungen der Gitterparameter als Funktion des elektrischen Feldes bis in Bereiche von  $\Delta d/d = 10^{-6}$  zu verfolgen. Eine exzellente Zählstatistik erlaubt es, die sehr geringen Intensitätsänderungen infolge Feldeinwirkung genau zu messen (Abb. 7).

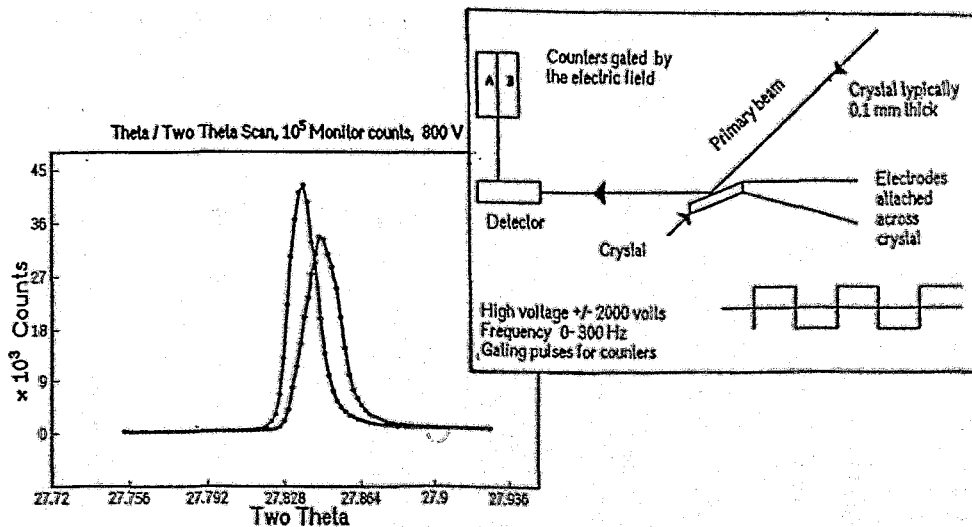


Abb. 7: Änderungen in  $\Delta d/d$  für den (006) Reflex in  $\text{LiNbO}_3$  als Folge einer in c-Richtung angelegten  $\pm V$ -Rechteckspannung (50 Hz, 800 V, Kristalldicke 0,2 mm). (Skizze des experimentellen Aufbaus eingefügt)



Die an dedizierten Synchrotronquellen existierenden Strahlrohre aus Ablenkmagneten und Wigglern bieten ein kontinuierliches Spektrum mit hohen Intensitäten bis zu etwa  $\lambda_c/4$  herabreichend. Die kritische Wellenlänge  $\lambda_c$  liegt für CHESS (Cornell High Intensity Synchrotron Source) bei  $\lambda_c=0,055$  nm (Wiggler) und beim NSLS bei 0,06/0,248 nm (Wiggler/Ablenkmagnet) wodurch Wellenlängen bis zu 0,02 nm bzw. 0,06 nm erreichbar sind. Infolge der Absorption in den Be-Fenstern, die den Vakuumteil von der Probenumgebung abtrennen, ist die obere Grenze des Bereichs generell mit 0,35 - 0,4 nm gegeben. Damit ist es möglich, die Wellenlänge für Elemente mit Z von 20 bis 70 auf die K-Absorptionskante, und für Elemente mit Z von 46 bis 100 auf die L-Kante abzustimmen.

Durch die Auswahl einer entsprechenden kantennahen Wellenlänge kann der atomare Streufaktor geeignet verändert werden. Die anomale Streuung wird bei Einkristalluntersuchungen vor allem genutzt um:

- das Phasenproblem zu lösen (z.B. [Ka 85]),
- Röntgen-Dichroismus und -Doppelbrechung (z.B. [Te 80]) zu studieren, oder
- benachbarte Elemente mit ähnlichen Werten der Ordnungszahl Z zu separieren.

Die Möglichkeit, eine intensive Quelle mit kurzen Wellenlängen nutzen zu können, hat bei Hochauflösung erfordernden Experimenten den signifikanten Vorteil, daß die Daten weitgehend frei sind von systematischen Fehlern wie Absorption und Extinktion. Die genauen Ladungsdichte-Bestimmungen, wie beispielsweise die Untersuchung der Elektronendichte von  $\text{Cr}(\text{NH}_3)_6\text{Cr}(\text{CN})_6$  [Ni 86], gehören zu Experimenten dieser Art. Es wird eine kurze Wellenlänge  $\lambda = 0,0302$  nm für die Bestimmung von insgesamt 7224 Intensitäten bis zu  $\sin\theta/\lambda = 11,5 \text{ nm}^{-1}$  genutzt. Aus 1968 unabhängigen Reflexen und 44 variablen Parameter konnte für Anpassung ein Wert von  $R=0,029$  erreicht werden, der beweist, daß die Synchrotronstrahlungsquellen auch für die Sammlung hochgenauer Diffraktionsdaten ausreichend stabil arbeiten.

### 3.2. Pulverdiffraktometrie mit Synchrotronstrahlung

Die entscheidenden Vorteile der Synchrotronstrahlung für die Untersuchung polykristalliner Materialien liegen in

- der *hohen Intensität*, die die Untersuchung selbst geringster Probenmengen gestattet,
- der *scharfen Kollimation* der Strahlung, die durch die kleinen Winkeldivergenzen zu einer hohen Auflösung führt,
- dem *polychromatischen Strahl*, d. h. im Primärstrahl sind alle Wellenlängen innerhalb eines weiten Bereiches vertreten.

Durch gezielte Ausnutzung dieser Eigenschaften lassen sich Diffraktometer konstruieren, die die Leistungsparameter hochwertiger Röntgendiffraktometer

weit übertreffen. Im folgenden werden die typischen Experimentiermethoden umrissen und ihre Besonderheiten erläutert.

### *Winkeldispersive Diffraktion*

Bei der winkeldispersiven Diffraktion (siehe Abb. 8) wird mit einem Doppel-Monochromator gearbeitet. Die relativ hohe Vertikaldivergenz des Strahles wird dabei durch zusätzliche, gekrümmte Spiegel fokussiert. Die von der Probe gestreute Strahlung wird entweder durch einen Analysatorkristall in den Detektor gebeugt oder durch einen Kollimator geführt. Bei Anwendung eines Kollimators kann eine Winkelauflösung bis  $0,03^\circ$  für  $2\theta$  erreicht werden. Speziell geschnittene Analysatorkristalle ermöglichen sogar eine Winkelauflösung bis  $0,001^\circ$  [Ha 91]. Diese extrem gute Auflösung erfordert natürlich eine hohe Intensität der Primärstrahlung.

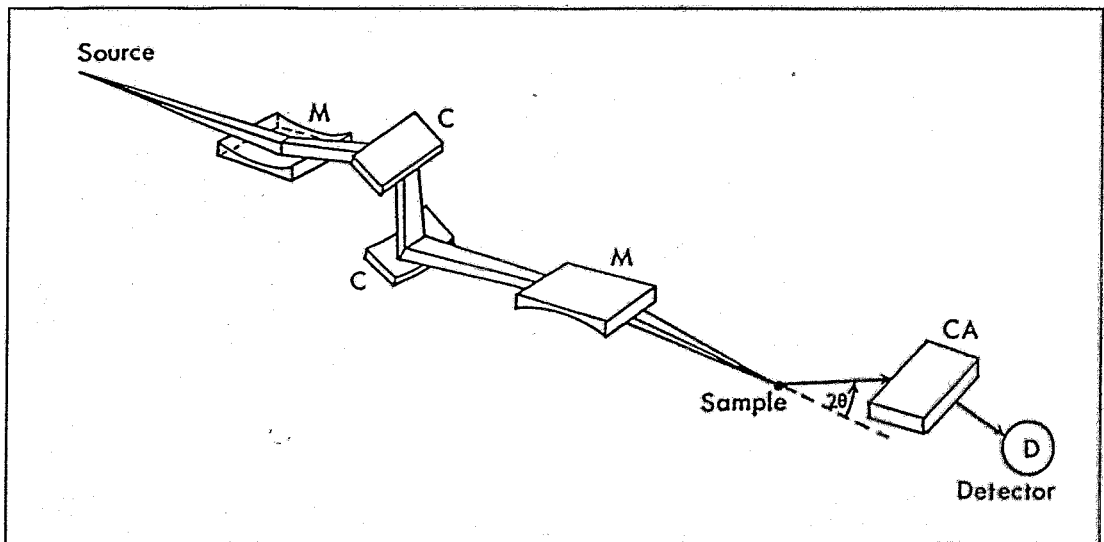


Abb. 8: Aufbau eines Pulverdiffraktometers für Synchrotronstrahlung [Ha 91]  
M - Spiegel; C - Kristallmonochromator; CA - Kristallanalysator; D - Detektor.  
Der Analysator kann durch einen Soller-Kollimator ersetzt sein.

Hochauflösende Diffraktometer werden vor allem zur Untersuchung von Proben mit niedriger Kristallsymmetrie eingesetzt. Die trotz der hohen Zahl der Reflexe weitestgehende Trennung der einzelnen Peaks erleichtert Struktur-Refinements etwa mit der RIETVELD-Methode. Diese hohe Auflösung gestattet ebenfalls die Untersuchung von Phasenübergängen, bei denen nur eine geringe Gitterdeformation stattfindet.

Von großem Vorteil ist es, daß die Peakform bei der Synchrotronstrahlung sehr gut durch eine GAUßkurve beschrieben werden kann [Wi 89].

$$G(2\theta) = H \exp\{-4 \ln 2 [(2\theta - 2\theta_0)/FWHM]^2\}$$

Gelegentlich werden auch LORENTZkurven oder eine Superposition von GAUß- und LORENTZkurven benutzt. Auch eine sogenannte doppelte GAUßfunktion wird zur Beschreibung der Peakform verwendet. Bei dieser handelt es sich um

eine Überlagerung einer regulären GAUßfunktion mit einer zweiten der halben Höhe und der halben Halbwertsbreite. Durch mehrfache Beugung an Monochromatorkristallen, Gittern oder Spiegeln ist die Synchrotronstrahlung frei von Anteilen höherer Ordnung.

Bei hochauflösender Röntgendiffraktion mit Röntgenröhren dagegen macht es sich störend bemerkbar, daß die Röntgenlinien stets eine Überlagerung von  $K\alpha_1$  und  $K\alpha_2$  darstellen. Diese Kurvenform kann nur ungenügend genau beschrieben werden und daher bereitet die Separation überlagerter Peaks Schwierigkeiten.

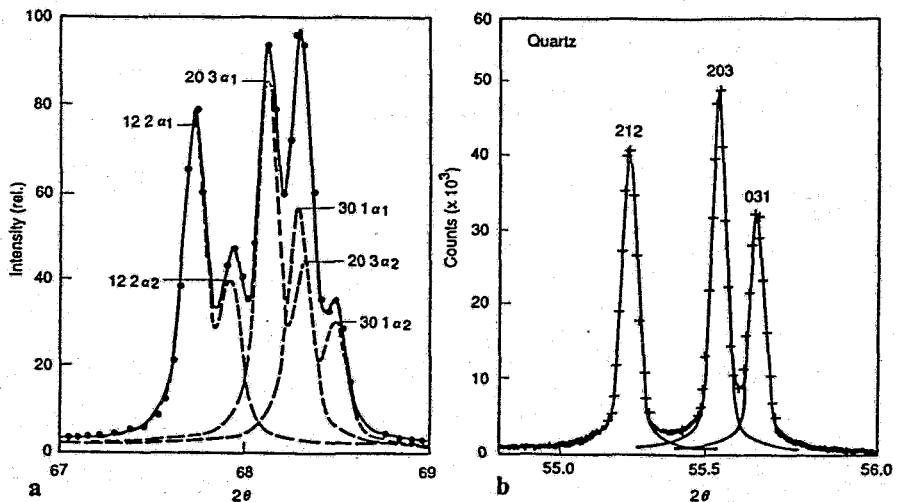


Abb. 9: Diffraktionsbild des Quarz-Tripletts (212), (203) und (031). Links (a) konventionelle Röntgendiffraktometrie mit  $\text{Cu-K}\alpha$ -Strahlung und rechts (b) Diffraktometrie mit Synchrotronstrahlung. Die höhere Auflösung ist evident.

Bei der winkeldispersiven Diffraction erfolgt normalerweise eine Variation des Streuwinkels  $2\theta_s$  bei fester Einschußwellenlänge. Dies wendet man vor allem in der Strukturanalyse und bei der Auswertung des Linienprofils an. In einer Variante der Methode kann man den Streuwinkel  $2\theta_s$  festhalten und die Wellenlänge mittels Variationen des Monochromatorwinkels  $2\theta_M$  durchstimmen. Man wählt diese Experimentiertechnik, wenn Einflüsse der Probenform vermieden werden sollen, nimmt dabei aber den Nachteil geringerer Auflösung in Kauf.

#### Energiedispersive Diffraction

Der polychromatische Primärstrahl erlaubt die unmittelbare Anwendung der energiedispersiven Diffraction. Mittels Halbleiterdetektoren oder Szintillatoren kann die Energie der registrierten Photonen auf direktem Wege bestimmt werden. Die BRAGGSche Gleichung

$$2d \sin \theta = \lambda = hc/\epsilon$$

ist mit der Photonenenergie  $\varepsilon$  als unabhängige Variable lösbar. Der Streuwinkel  $2\theta$  kann dabei beliebig gewählt werden. Im Vergleich mit der energiedispersiven Röntgenbeugung mit Röntgenröhren, wobei die Anodenspannung so gewählt werden muß, daß nur die kontinuierliche Bremsstrahlung angeregt wird, wird bei der Synchrotronstrahlung ein wesentlich größerer Energiebereich erfaßt. Hauptanwendungsgebiet der energiedispersiven Diffraktion sind Untersuchungen von Stoffen unter extremen Bedingungen, z.B. unter hohem Druck. Die Konstruktion der Druckkammer läßt nur bestimmte Ein- und Austrittsfenster zu, so daß in der Regel ein fester Streuwinkel eingestellt werden muß. Zum anderen ist das bestrahlte Probenvolumen klein, bei Röntgenbeugung an Laborquellen würde die Intensität nicht ausreichen. Bei der energiedispersiven Diffraktion kann eine Überbelastung der Detektoren ein Problem werden, wenn gut streuende Proben zu untersuchen sind. In diesen Fällen wird der Primärstrahl mit einer Blende oder einem Absorber in seiner Intensität verringert oder auch mit einem durchstimmbaren Monochromator monochromatisiert.

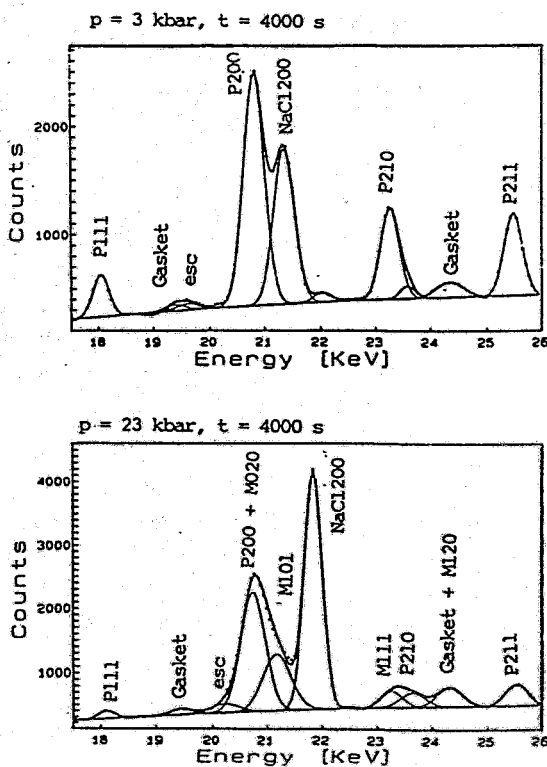


Abb. 10: Diffractionsbilder von  $\text{CuS}_2$  bei unterschiedlichem Druck gemessen mit energiedispersiver Diffraktometrie

### Anomale Dispersion

Die Möglichkeit, die Energie der einfallenden Strahlung variieren zu können, erlaubt es, durch Ausnutzung der anomalen Dispersion gezielt einzelne Elemente bei der Strukturbestimmung "anzusprechen". Wird die Energie so gewählt, daß sie im Bereich einer Absorptionskante für Röntgenstrahlung (z. B. der K-Kante) liegt, so wird ein Teil der einfallenden Strahlung zur Anregung der

inneren Elektronen "verbraucht" und von diesen Gitterplätzen wird bedeutend schwächer oder überhaupt nicht gestreut. Durch sequentielle Einstellung der jeweiligen Energie der Absorptionskanten kann jeweils ein bestimmtes Element zur anomalen Streuung gebracht werden. Bei der Pulverdiffraktometrie spielt das vor allem eine Rolle, wenn in der Probe im Periodensystem eng benachbarte oder sehr weit entfernte Elemente enthalten sind. In gewissem Sinne eröffnet die anomale Dispersion der Röntgendiffraktometrie den Zugang zu Problemstellungen, die früher die Domäne der Neutronendiffraktion waren.

### 3.3. Zeitaufgelöste Experimente mit Synchrotronstrahlung

Mit dem Einsatz geeigneter Detektoren läßt sich die zeitaufgelöste Diffraktion intensiv nutzen. Eine Übersicht findet man in [St 88]. Die wesentliche Beschränkung stellt die Leistungsfähigkeit der Detektoren dar.

Die Synchrotronstrahlung bietet wegen ihrer hohen Strahlintensität die Möglichkeit der 'in situ' Beobachtung struktureller Änderungen in Materialien. Statt Meßzeiten von Stunden bei konventionellen Röntgenexperimenten (die bei Verwendung von ortsempfindlichen Detektoren in den Minutenbereich reduziert werden können), lassen sich die Meßzeiten bei Verwendung von Synchrotronstrahlung von Stunden auf Sekunden bis ms verringern. Bei Einsatz von Hochtemperatur-, Tieftemperatur-, Reaktions-, und Druckkammern kann man zeitaufgelöst Prozesse der Phasenbildung und Phasentransformation (z.B. bei Kristallisation, Hydratisierung oder Entmischung), die in dieser Zeitskala ablaufen, direkt beobachten.

Abb. 11 zeigt die Zeitabhängigkeit des Streudiagramms (Meßzeit pro Diagramm: 3 s) einer auf 135 °C abgekühlten Polymerschmelze. Aus dem Zeitverlauf erhält man die kinetischen Parameter und kann damit den Kristallisationsprozeß beschreiben [Mo 91].

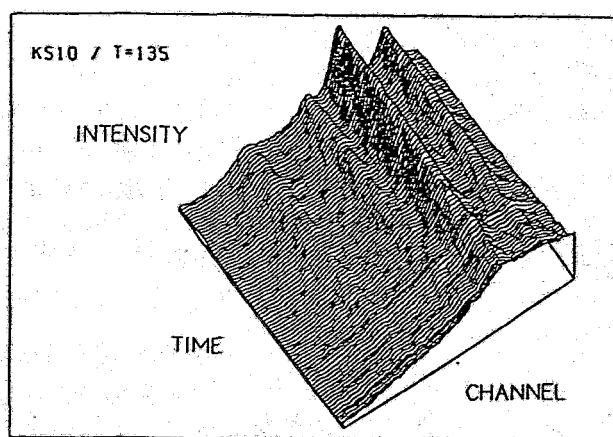


Abb. 11:  
Röntgenbeugung von  
Polypropylen bei  
T = 135°C im Zeitverlauf

In der chemischen Kristallographie ist desweiteren die gepulste Struktur der Synchrotronstrahlung von Bedeutung, da sie zeitaufgelöste Experimente

gestattet, die detaillierte Informationen über die Dynamik von Strukturen auf einer Zeitskala im Mikrosekundenbereich liefern können.

Für spezielle Kurzzeitmessungen ist die detaillierte Kenntnis der 'Bunch'-Form während des Experiments wichtig. Durch die Hochfrequenz der Maschine ist die Anzahl der 'Buckets' entlang des Umfangs festgelegt. Da diese aber wahlweise mit Elektronen aufgefüllt werden können, ist dadurch die Bunch-Wiederholungsrate veränderbar (DORIS z.B. hat 480 Buckets. Sind davon 120 aufgefüllt, ergibt sich an einem festen Punkt der Umlaufbahn eine Bunch-Wiederholungsrate von 1  $\mu$ s.) Die Impulslänge (z.B. von 0,15 ns bei DORIS) der Bunchs kann bis in den ps-Bereich verringert werden. Bei reduzierter Bunch-Anzahl ist die Peakintensität  $I_p$  um den Faktor  $t_o/t_b$  gegenüber der gemittelten Intensität  $I_a$  vergrößert (z.B. bei DORIS: um 1000/0,15=6600).

Bei der Analyse der Synchrotronstrahlung wird die gepulste Struktur genutzt, die Detektionsphasen zu synchronisieren, um die gestreuten Photonen des jeweiligen Bunchs zu registrieren (z.B. in Driftkammern, lokalisiert aus der Ortsinformation und der Laufzeit der ausgelösten Photoelektronen). Die Zeitskala solcher Experimente wird wesentlich durch die Einzelimpulsdauer und die Wiederholungsfrequenz bestimmt (bei DORIS: 140 ps und 1,04 MHz im Einzelbunchbetrieb,  $10^6$  Photonen pro Impuls,  $10^{12}$  cps Fluß an der Probe).

Zeitaufgelöste Experimente z.B. an Molekülstrukturen können sowohl strukturell (etwa Änderung der Ortskoordinate(n) im geometrischen Strukturfaktor) als auch spektroskopisch (Änderung der Streulänge(n) gewisser Atomarten) ausgerichtet sein. Da in Diffraktionsexperimenten nicht mehr als ca. 1% der Photonen gestreut werden (DORIS ca.  $10^4$  pro Impuls), lassen sich signifikante Änderungen oft erst nach mehrfacher zyklischer Wiederholung der Messung nachweisen.

Zeitaufgelöste Röntgendiffraktion ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn strukturelle Relaxationen (z.B. Mischung, Diffusion, Selbstorganisation oder andere (makro)molekulare Umordnungen infolge der Änderung äußerer Parameter wie z.B. elektrische bzw. magnetische Felder, Druck oder Temperatur) auftreten, die nicht durch die leichter verfügbaren spektroskopischen Methoden im Gebiet des sichtbaren Lichtes oder des nahen UV-Bereichs nachgewiesen werden können [Bo 83].

Die Schaffung des Nicht-Gleichgewichtszustands, dessen Relaxations- oder Reaktionsabläufe von Interesse sind, sollte im Vergleich zu diesen Vorgängen schnell und im gesamten Probenvolumen möglichst homogen erfolgen. Gepulste (inkohärente und kohärente) Lichtquellen erwiesen sich für den bei Experimenten am Synchrotron geforderten Sub-Mikrosekundenbereich als effektive Methode zur 'Störung' der Probe.

Die Beobachtung von strukturellen Änderungen mittels Diffraktion bei einer Wiederholungsrate von 1 MHz wird in [Ba 88] beschrieben.

#### 3.4. Strukturanalyse an nichtkristallinen Materialien

Nichtkristalline Substanzen (amorphe Metalle, Gläser, Schmelzen, Polymere und andere stark ungeordnete Materialien) liefern nur diffuse Streudiagramme mit geringer Intensität. Für die Diskussion der atomaren Struktur solcher Materialien werden aus den Streudiagrammen durch Fouriertransformation radiale Verteilungsfunktionen der Atome berechnet. Mit Synchrotronstrahlung kurzer Wellenlänge ( $\leq 0,5$  Å) lassen sich die Streuintensitäten bis zu hohen k-Werten ( $k = 4\pi\sin\theta/\lambda > 10$  Å $^{-1}$ ) messen und damit eine hohe Auflösung der Verteilungsfunktionen im Ortsraum erzielen. Das ist für die Diskussion und

Unterscheidung von Strukturmodellen wesentlich. Bei mehrkomponentigen Systemen ist die Bestimmung von partiellen (elementspezifischen) Verteilungsfunktionen notwendig, wenn man detailliertere Aussagen über die chemische und topologische Nahordnung erhalten will. Die Bestimmung partieller Strukturfunktionen erfordert die Messung des Streudiagramms bei verschiedenem Streuvermögen der einzelnen Komponenten. Dazu bietet die anomale Röntgenstreuung eine elegante Möglichkeit, da das kontinuierliche Spektrum der Synchrotronstrahlungsquelle die Durchstimbarkeit der Wellenlänge erlaubt. Abb. 12 zeigt die an einer amorphen Pd-Zr-Legierung erhaltenen Strukturfaktoren (proportional der Streuintensität) bei verschiedenen Energien der Röntgenstrahlung [Pa 89]. Die Auswertung der Kurven gibt Informationen über die partiellen Atomverteilungen und Koordinationszahlen.

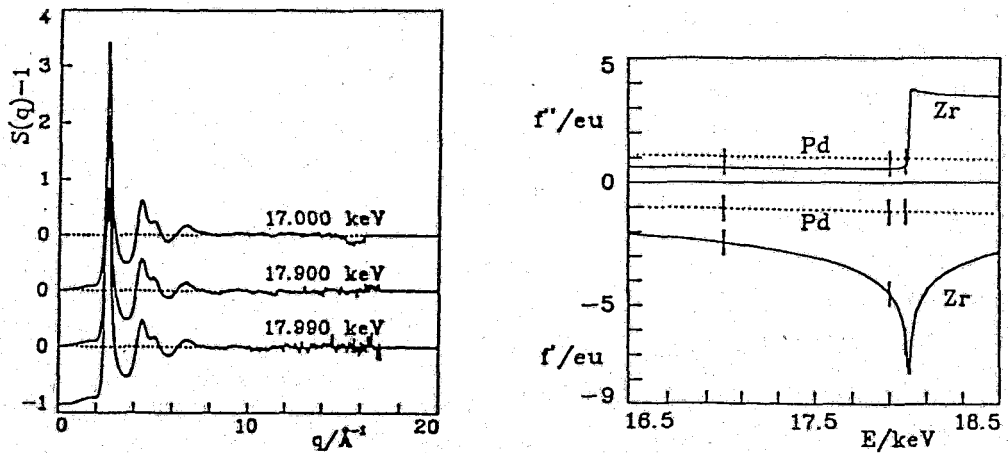


Abb. 12: Strukturfaktoren von amorphem Pd-Zr, gemessen bei verschiedenen Energien (links). Die Zuordnung der Atomformfaktorbeiträge zu den Komponenten bei den gewählten Energien ist im rechten Bild gezeigt.

Eine direkte Zuordnung der partiellen Funktionen zu Atompaaeren ist nur bei binären Systemen möglich. An Multikomponentensystemen ist die Trennung von Einzelbeiträgen nur selten möglich. Man kann jedoch unter Nutzung der anomalen Dispersion auf die Umgebung eines Atoms bezogene Verteilungsfunktionen bestimmen [Ma 90]. Abb. 13 zeigt die normale und die auf die Ni-Umgebung bezogene Verteilungsfunktion in einer amorphen  $\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{20}$ -Legierung [Wa 91]. Die umgebungsbezogene Funktion enthält nur Paarbeiträge in denen Nickel involviert ist, gewichtet mit der Konzentration, so daß das Maximum  $r_1$  in diesem Beispiel La-Ni-Paaren zuzuordnen ist. Mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie (EXAFS, XANES) kann selektiv die lokale Umgebung der durch die Wahl der Photonenenergie bestimmten Atomsorte analysiert werden. Die Oszillationen in der Umgebung der Absorptionskante sind nur durch die Nahordnung bestimmt. Abb. 14 zeigt EXAFS (links) und XANES (rechts) Ergebnisse an amorphem und nanokristallinem  $\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  [BI 91]. Die Messungen erfolgten an

der Eisenabsorptionskante, so daß im wesentlichen Fe-Fe-Korrelationen im EXAFS-Beitrag dargestellt werden. Der Vergleich mit einem kristallinen Eisenstandard zeigt, daß die nanokristallinen Bereiche vor allem in einer kubisch raumzentrierten Nahordnung existieren.

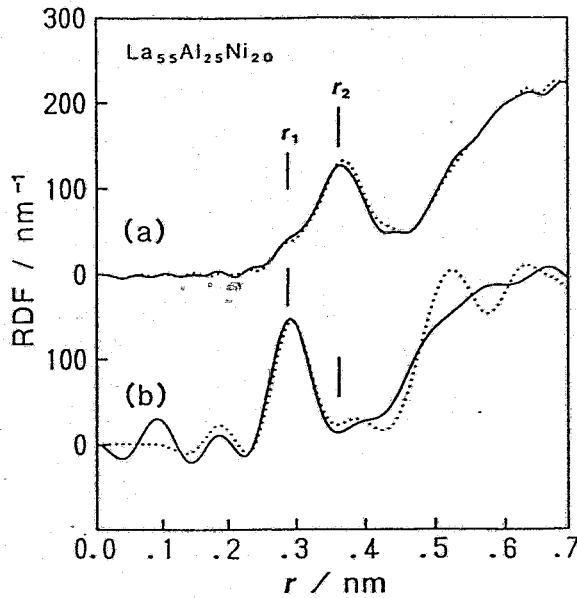


Abb. 13: Normale (a) und auf die Ni-Umgebung bezogene (b) Radialverteilungsfunktion einer amorphen  $\text{La}_{55}\text{Al}_{25}\text{Ni}_{20}$ -Legierung [Wa 91]. Die durchgezogene Linie entspricht der frisch abgeschreckten Probe und die punktierte der erhaltenen. Das Maximum bei  $r_1=0,28$  nm wird den La-Ni-Paaren zugeordnet und ist aufgrund der geringen Nickelkonzentration in der Probe in Kurve (a) nur schwach sichtbar.

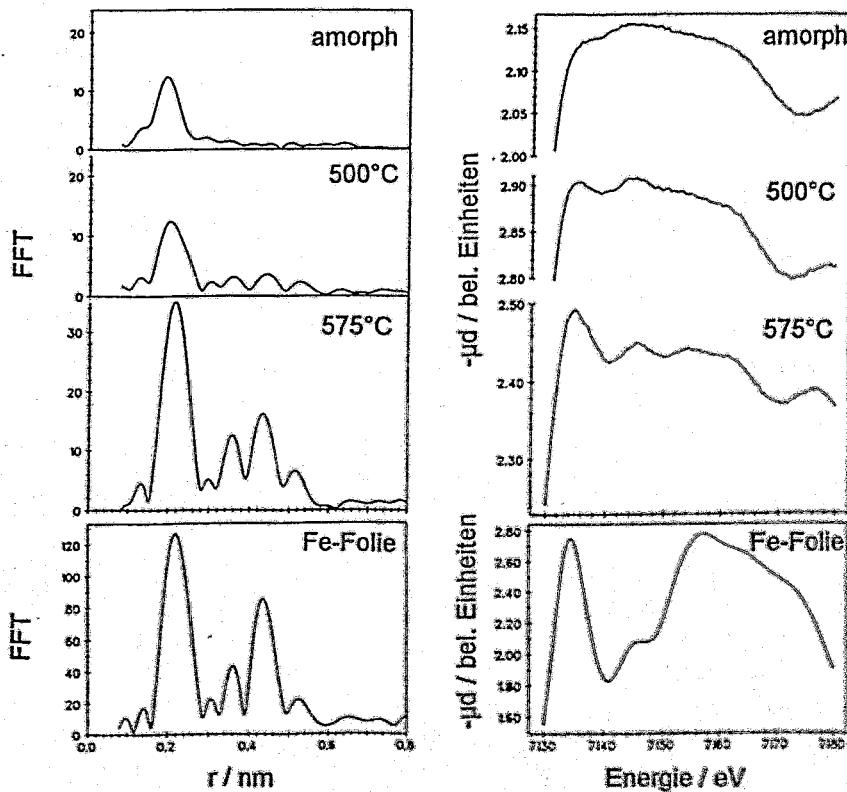


Abb. 14: Fouriertransformierte der EXAFS-Spektren (links) und XANES-Spektren (rechts) von amorphem (oben) und nanokristallinem (Mitte)  $\text{FeSiBNbCu}$ . Als Vergleich ist unten ein reines Eisenspektrum angegeben.



### 3.5. Untersuchung von Oberflächen und dünnen Schichten

Röntgenbeugung, Röntgenfluoreszenz und Röntgenabsorption werden bei streifendem Einfall der Strahlung im Bereich des Grenzwinkels der Totalreflexion (typische Werte:  $0,5^\circ$  oder  $10 \text{ mrad}$ ) inhärent oberflächenempfindlich. Wie in Abb. 1a dargestellt, legt der Strahl bei flachem Einfall einen langen Weg in der Oberflächenschicht zurück. Er wird dort stark absorbiert, so daß das tieferliegende Trägermaterial fast nicht zur Streuung beiträgt. Abb. 15 zeigt Diffraktionsbilder eines TiN-Film von  $3000 \text{ \AA}$  Dicke auf einer Glasschicht bei verschiedenen Einfallswinkeln [Bu 89], um den Effekt der zunehmenden Oberflächenempfindlichkeit zu demonstrieren. Für Arbeiten mit streifendem Einfall der Strahlung sind die hohe Parallelität und die hohe Intensität der Synchrotronstrahlung besonders wichtig. Erstere bestimmt die Genauigkeit der Tiefenselektivität mit, während letztere wegen des kleinen Streuvolumens viele Experimente überhaupt erst ermöglicht. Da die Absorption von Röntgenstrahlung wellenlängenabhängig ist, kann das kontinuierliche Spektrum der Strahlung sehr vorteilhaft für die Variation der Eindringtiefen genutzt werden.

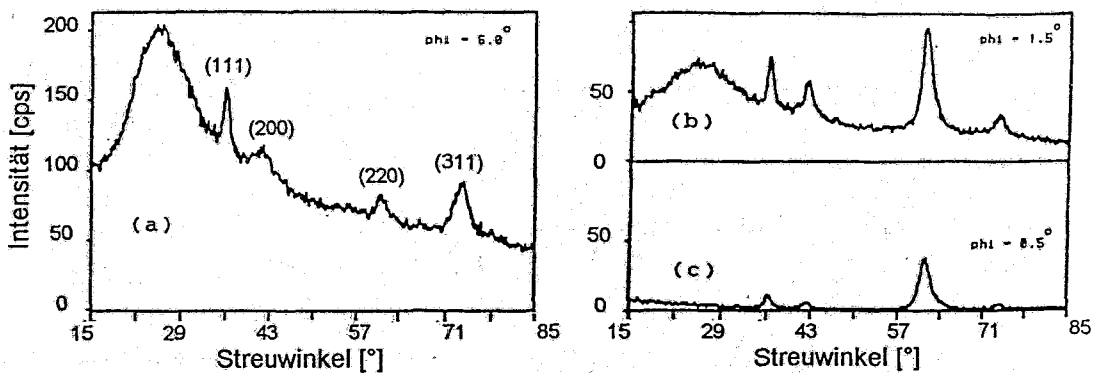


Abb. 15: Diffraktionsbilder einer  $3000 \text{ \AA}$  dicken TiN-Schicht auf einem Glassubstrat bei verschiedenen Einfallswinkeln der Röntgenstrahlung  $\phi$ .

Beim Studium von Oberflächen oder dünnen Schichten lassen sich mit Synchrotronstrahlungsmethoden Aussagen zur Struktur und Zusammensetzung, zu Brechungsindex, Schichtdicke und Rauigkeit oder zur "Realstruktur" erhalten.

Bei der Untersuchung von Struktur und Zusammensetzung im Oberflächenbereich werden sowohl Diffraktions- als auch Absorptionsmethoden eingesetzt. Eine wichtige Aufgabe ist die oberflächenempfindliche Phasenanalyse. In Abb. 16 sind Ergebnisse der Untersuchungen nach Implantation von  $^{14}\text{N}^+$ -Ionen in Titan gezeigt [Ka 91]. Erst bei flachen Einfallswinkeln und damit geringen Eindringtiefen werden die entstandenen Ti-N-Phasen im Diffraktionsbild (Abb. 16 d) deutlich.

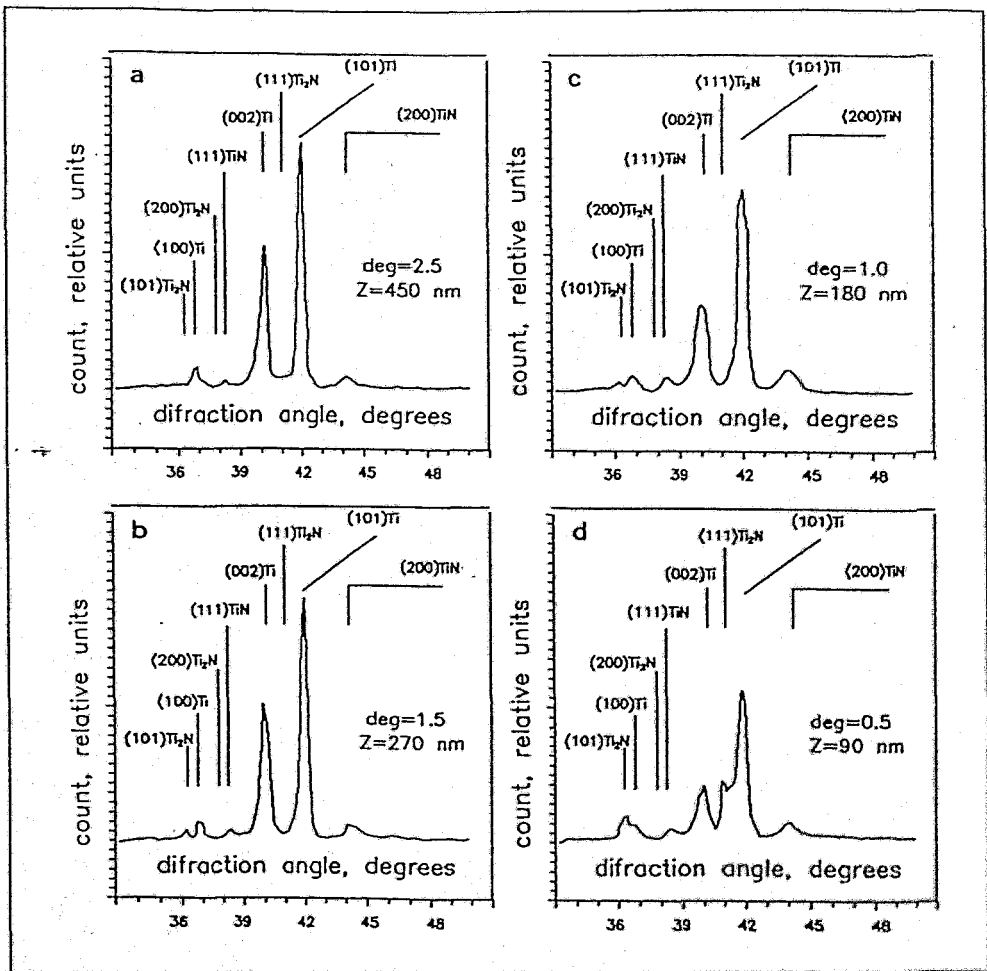


Abb. 16: Röntgendiffraktionsspektren von Ti-Schichten nach Implantation von  $^{14}\text{Ni}^+$  (Energie 5 keV, Fluenz  $10^{18}$  Ionen/cm $^2$ , Stromdichte 80-100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) aufgenommen unter verschiedenen Einfallswinkeln der Röntgenstrahlung (a) 2,5°, (b) 1,5°, (c) 1° und (d) 0,5° (nach [Ka 91])

An Ober- und Grenzflächen von einkristallinen Materialien kommt es zu Umordnungen der Atome, so daß neue zweidimensionale Strukturen entstehen. Diese zu verstehen ist bedeutungsvoll für Probleme der Katalyse, Elektrolyse, Tribologie, Metallurgie oder elektronischer Bauelemente. Mit Hilfe der Technik des streifenden Einfalls wurden Strukturfaktoren für zweidimensionale Gitter wie z.B. Ge (001) (2x1), InSb (111) (2x2) oder Si(111) (7x7) [Fu 92] gemessen und daraus durch Pattersonsynthese die Oberflächenstrukturen rekonstruiert.

Neben der Strukturbestimmung sind es in Analogie zur Untersuchung von Poly- oder Einkristallen auch Studien der Phasenübergänge im Oberflächenbereich, die mit Synchrotronstrahlung unter streifendem Einfall durchführbar werden. So wurde beispielsweise der (002)-Braggreflex auf einer Al(110)-Oberfläche beim Winkel der Totalreflexion in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht [Do 91]. Die Braggintensität wird weit unterhalb der Schmelztemperatur ( $T_m=933$  K)

deutlich verändert. Die Analyse der Intensitäten ergibt, daß ab 770 K, also weit unterhalb der Volumenschmelztemperatur, die oberste Atomlage eine quasi-flüssige Struktur besitzt.

Für Problemstellungen, die auf die Analyse der Umgebung eines bestimmten Elements abzielen, ist die Oberflächen-EXAFS eine empfindliche Methode. Der Röntgenstrahl wird dabei unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion gestreut, so daß die Methode die unmittelbare Oberflächenschicht analysiert. Mit der Variation der Energie um die Absorptionskante eines Elementes enthält das EXAFS-Signal Informationen über die Nahordnungsstruktur. Da das EXAFS-Signal weniger als ein Prozent der totalen Fluoreszenzausbeute ausmacht, liegen die Nachweisempfindlichkeiten im Bereich von  $>100$  ppm, was Oberflächenbedeckungen bis hinunter zu einer Monolage entspricht. Damit können beispielsweise die Strukturen von Adsorbatschichten untersucht werden [Ro 92]. Bei geringen Konzentrationen des Sondenatoms wird dann die Fluoreszenz-EXAFS eingesetzt, die die emittierte charakteristische Strahlung nutzt. Beispiele werden im Abschnitt 3.10. dargestellt.

### *Stehende Wellen*

Eine spezielle oberflächensensitive Technik arbeitet mit stehenden Wellen der Röntgenstrahlung. Stehende Wellen werden gebildet, wenn sich eine einfallende und eine reflektierte ebene Welle überlagern. Ihre Periode ist umgekehrt proportional zur Differenz der Wellenvektoren beider Wellen. Es entsteht eine räumliche Modulation (Wellenknoten und Wellenbäuche) der Wellenerscheinung, d.h. bei Synchrotronstrahlung der elektrischen und magnetischen Feldstärke. Wenn sich beispielsweise ein Atom in einem derartigen Wellenfeld befindet, wird es je nach seiner Position (Wellenknoten, -bauch oder dazwischen) unterschiedliche Anteile der einfallenden Strahlung absorbieren können, dadurch in einen energetisch angeregten Zustand gebracht werden und über Sekundärprozesse (Fluoreszenz, Photoelektronen- oder Augerelektronenemission) die Energie wieder abgeben können. Bei der physikalisch bestimmten Lage des Wellenfeldes zur Oberfläche ist es somit möglich, die Atomposition bezüglich dieser Oberfläche zu lokalisieren. Dabei können dies die Atome der untersuchten Probe selbst oder adsorbierte oder eingelagerte Fremdatome sein. Adsorptionsuntersuchungen können noch ausgeführt werden, wenn die Oberfläche mit 0,1 Monolagen der zu untersuchenden Substanz bedeckt ist.

Es sind zwei Verfahren bekannt, derartige Wellenfelder zu erzeugen und ihre Phasenlage relativ zu den zu untersuchenden Atomen zu verändern:

#### • Äußere Totalreflexion an einer Oberfläche

Der Grenzwinkel der Totalreflexion liegt in der Größenordnung von einigen 10 Bogenminuten je nach Zusammensetzung des spiegelnden Materials. Wird eine ebene Welle totalreflektiert, kommt es unmittelbar vor der Oberfläche zur Ausbildung eines stehenden Wellenfeldes, das sich bis in den Mikrometerbereich ins Innere des Spiegelmaterials fortsetzen kann [Be 89]. Die Periode des stehenden Wellenfeldes und die Lage seiner Knoten und Bäuche hängt vom Einfallswinkel ab. Diese Gesetzmäßigkeit kann genutzt

werden, um die Lage der Wellenknoten und -bäuche durch die Position von an der Oberfläche liegenden Atomen zu bewegen, die ihrerseits weniger oder mehr Strahlungsenergie absorbieren können.

• Diffraction im Bragg-Fall

Grundlage dieser Methode ist eine Braggreflexion an einem strukturell perfekt gebauten Substrat, so daß die durch die dynamische Diffractionstheorie beschriebenen Effekte genutzt werden können. Hierbei wird das stehende Wellenfeld durch die kohärente Superposition der einfallenden ebenen Welle mit der durch Bragg-Interferenz an einer Kristallebene (hier parallel zur Oberfläche) erzeugten Welle gebildet [Ma 84]. Die Periode dieses Wellenfeldes stimmt mit dem Abstand der kristallographischen (Netz-)Ebenen überein (Abb. 17). Es ist sowohl vor der Kristalloberfläche als auch im Kristallinnern ausgebildet. Diese Interferenz wird in einem nur einige Bogensekunden breiten Intervall um den Bragg-Winkel erzeugt. Beim Überstreichen dieses Winkelbereiches wird die Phasenlage des stehenden Wellenfeldes um  $\pi$  geändert, d.h. Wellenknoten und -bäuche können um eine halbe Periode bewegt werden. Bei Einstrahlung unterhalb des Bragg-Winkels liegen die Wellenknoten an den Orten maximaler Elektronendichte (den Netzebenen), während bei Einstrahlung oberhalb des Bragg-Winkels die Wellenbäuche an diesen Orten liegen. In letzterem Falle wird ein gegenüber dem Mittelwert erhöhter Anteil an Strahlungsenergie absorbiert und in einem möglichen Sekundärprozeß z.B. als Fluoreszenzstrahlung emittiert.

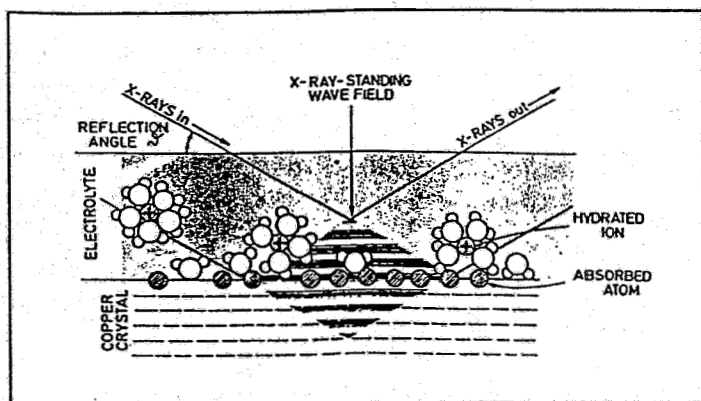


Abb. 17:  
Aufbau des stehenden Wellenfeldes im Bragg-Fall am Beispiel einer Kupferoberfläche in einem elektrolytischen Bad [Ma 87].

In Abb. 18 ist die Fluoreszenzausbeute von verschiedenen Elementen (Cd, S, Cl) gezeigt, die gleichzeitig an einer Kupferoberfläche adsorbiert waren. Am Kurvenverlauf ist zu erkennen, daß chemisch unterschiedliche Atome an unterschiedlichen Positionen angelagert sind. Die Cadmiumatome liegen in den Kupferebenen, während Schwefel- und Chloratome zwischen ihnen lokalisiert sind.

Mit diesem hochauflösenden Verfahren können die Wellenfelder auf ungefähr 1% des Netzebenenabstands positioniert werden. Dementsprechend genau ist die Bestimmung der Atomlagen senkrecht zur beugenden Netzebene. Nutzt man höhere Ordnungen der gleichen Netzebenen-schar, kann man Informationen über die mittlere Schwingungsamplitude der zu untersuchenden Atome gewinnen. Wenn Messungen mit unterschiedlichen Beugungsebenen

ausgeführt werden, kann in einer Art Triangulation die Atomposition in allen drei Dimensionen bestimmt werden.

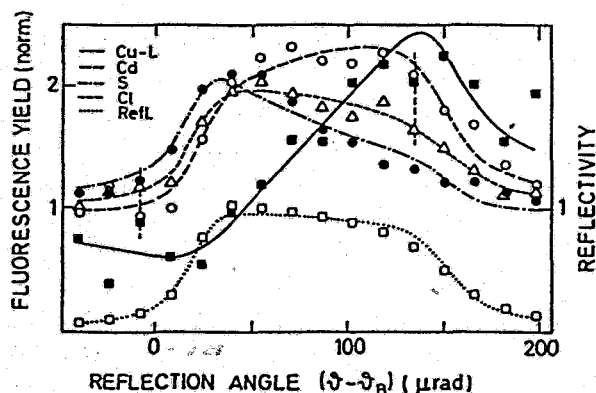


Abb. 18: Fluoreszenzausbeute für verschiedene Atomsorten auf einem Kupferkristall [Ma 87]. Zum Vergleich sind die Fluoreszenzausbeute der Kupfer-Volumenatome (Schichtdicke 15 nm) und die Kupferreflektivität eingezeichnet.

### 3.6. Realstrukturanalyse

Mit dem Begriff Realstruktur wird zum Ausdruck gebracht, daß sich zur umfassenden Charakterisierung eines Materials die Erarbeitung eines Modellbildes erforderlich macht, welches die in Wirklichkeit vorhandenen Abweichungen vom ideal-kristallinen Aufbau widerzuspiegeln vermag. Die Einzelkristallite sind durch unterschiedlich strukturierte Oberflächen voneinander abgegrenzt und gegeneinander verkippt (a). Sie haben elastische Spannungen, die lokale Änderungen der Gitterkonstanten hervorrufen (b). Schließlich sind den idealen Kristallaufbau störende Gitterfehlordnungen zu berücksichtigen (c). Eine Reihe wesentlicher Materialeigenschaften (z.B. Festigkeit) wird jedoch gerade durch alle die genannten Abweichungen von der Idealstruktur signifikant beeinflusst. Verfahren zur Realstrukturanalyse sind deshalb ein wichtiges Instrument jeder Materialforschung.

(a): Werden die Orientierungen bestimmter Kristallebenen aller lokal zueinander verkippten Kristallite relativ zu einem äußeren Koordinatensystem (z.B. Probensystem) dargestellt, so spricht man von Polfiguren. Diese sind in einem Beugungsexperiment meßbar und Ausgangspunkt für die Berechnung von Orientierungsverteilungsfunktionen (OVF) der Kristallite, dem Hauptziel der Texturanalyse. Der wesentliche Vorteil des Einsatzes von Synchrotronstrahlung gegenüber konventioneller Röntgenstrahlung für diese Zwecke liegt, außer in den höheren Photonenflüssen und damit geringerem Meßzeitaufwand, vor allem in der wählbaren, größeren Eindringtiefe  $t$  und somit einer volumenrepräsentativen Gesamtaussage begründet (Näherung für Absorption  $t \sim \lambda^{-3}$ ). Damit ist ein Konkurrenzverfahren zur Neutronentexturanalyse gegeben, dessen Nutzung mit der Verringerung der Zahl der verfügbaren Neutronenquellen in Zukunft sprunghaft ansteigen wird. Bei der bisher ersten bekanntgewordenen Texturanalyse mittels Synchrotronstrahlung [Sc 92] wurde versucht, an nicht-zentrosymmetrischem CuCl durch Messungen von nördlicher

und südlicher Polhalbkugel jeweils unter- bzw. oberhalb der Cu-Absorptionskante auf Differenzen in der Poldichteverteilung zu stoßen, die die Möglichkeit zur Berechnung des sonst unzugänglichen, ungeraden Anteils von Entwicklungskoeffizienten der OVF geben [Bu 81]. Als Gründe für bisher nicht eindeutig registrierbare Differenzeffekte führen die Autoren neben Probenspezifika vor allem den Umstand an, daß ein weiterer Vorteil der Synchrotronstrahlung, die kontinuierlich durchstimbare Wellenlänge, noch nicht optimal ausgenutzt worden ist.

(b): Bildet man von der BRAGGSchen Gleichung das totale Differential, so entsteht ein Term, der zeigt, daß bei einer Netzebenenabstandsänderung  $\Delta d$  Beugungswinkelverschiebungen  $\Delta\theta$  beobachtet werden, die direkt mit den im Material vorhandenen Verzerrungen  $\varepsilon$  und über das Hooksche Gesetz (Elastizitätsmodul  $E$ ) mit den jeweiligen Spannungen  $\sigma$  in Zusammenhang stehen. In der Praxis werden die Verschiebungen  $\Delta\theta$  im sogenannten  $\sin^2\psi$ -Verfahren gemessen, indem der Einstrahlungswinkel  $\psi$  auf die Probe variiert wird. Besonders schwierig gestalten sich die Messungen dann, wenn sich mit dem Abstand von der Probenoberfläche sowohl die Spannungsverhältnisse als auch die Textur ändern. Genau für diese, in der Realität dominierenden Fälle ist der Einsatz der Synchrotronstrahlung angezeigt, da hier durch Energie- und /oder Winkeländerung günstig eine Variation der Eindringtiefe vorgenommen werden kann. Seit 1989 arbeiten mehrere Gruppen auf dem Gebiet der Erforschung oberflächennaher Gitterdeformationszustände mittels Synchrotronstrahlung [HA 89]. Naturgemäß bilden dabei auf der Basis unterschiedlichster Verfahren hergestellte dünne Schichten einen wichtigen Problemkreis. Da aufgrund der hohen Parallelität der Strahlung eine quasi punktförmige Abrasterung der an der Oberfläche liegenden Kristallite vorgenommen werden kann, wurde auch mit Spannungsanalysen im Mikrobereich von Vielkristallen begonnen. Abb. 19 zeigt schematisch das grobkörnige Gefüge in einer untersuchten Ni-Basislegierung [Cr 91]. Die experimentell ermittelte lokale  $\sigma_{11}$ -Komponente in Richtung einer vorgegebenen äußeren Zuglast von 250 MPa ist für markierte Körner in Abb. 20 wiedergegeben.

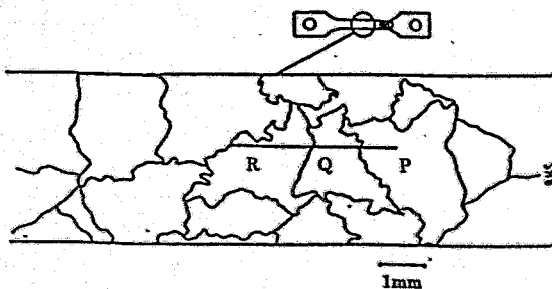


Abb. 19:  
Schematische Darstellung des grobkörnigen Gefüges

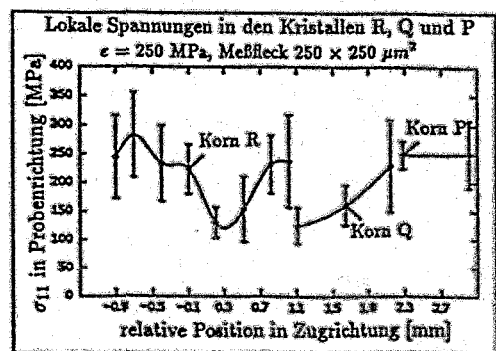


Abb. 20:  
Lokale Spannung an verschiedenen Orten entlang der Zugrichtung

Man erkennt, daß innerhalb der einzelnen Körner mit Spannungsschwankungen zu rechnen ist, die in ihrem Ausmaß mit den Spannungsinhomogenitäten von Korn zu Korn vergleichbar sind. Aussagen dieser Art sind sehr attraktiv, da sie wesentlich zum Verständnis von Korn-Korn-Kopplungen beitragen.

(c): Ein weiterer Term (siehe (b)) erklärt den Fall, wenn infolge von Gitterfehlordnungen zwischen reflektierten Strahlen von benachbarten Netzebenen kein ganzzahliger Wellenlängenunterschied besteht. Dadurch sind die Strahlen nicht mehr genau überlagert, wie von der Braggschen Gleichung gefordert, und es werden zusätzliche Streuanteile bei  $\theta \pm \Delta\theta$  beobachtet. Anhand von theoretischen Betrachtungen [Kr 83] ergibt sich damit bei Anwendung geeigneter Profil-Fitverfahren (Fourier-Analyse) die Möglichkeit, aus der Form der Linie der reflektierten Strahlung quantitativ auf Art und Menge verschiedener Gitterstörungen zu schließen. Die Verwendung der Synchrotronstrahlung für dieses Untersuchungsgebiet hat wegen der geringen Strahldivergenz den Vorteil, daß verfahrensbedingte Meß- und Auswerteunsicherheiten so weit reduziert werden können, um probenrelevante Aussagen auch im Falle strukturell inhomogener Materialien treffen zu können.

In [Ks 92] werden die Ergebnisse solcher Untersuchungen im Vergleich zu globalen, mittels Neutronenbeugung bestimmten Gitterstörendichten diskutiert. Die Autoren stellen Unterschiede in der erwarteten Größenordnung fest, weisen aber gleichzeitig auf eine im Sinne der Zuverlässigkeit der Aussagen deutlich zu verbessernde Meßstatistik hin. Es besteht daher in Zukunft ein wesentlich erhöhter Meßzeitbedarf.

### 3.7. Spannungen und Deformationen in Oberflächenschichten

Da die Synchrotronstrahlung intensitätsstark ist, können stark kollimierte Röntgenstrahlen genügender Intensität formiert werden, um Spannungs- und Deformationsfelder in nahezu perfekten Kristallen in einer dünnen Oberflächenschicht bzw. im Volumen oder durch Defekte bedingte diffuse Streuung an einer Deckschicht zu untersuchen. Hohe Empfindlichkeit und hohes Auflösungsvermögen werden durch die für die dynamische Diffraktionstheorie charakteristischen Effekte erzielt. Daher sind Zwei- und Mehrkristalldiffraktometer mit perfekten Kristallen typische Instrumente für diese Aufgabenstellung [La 88] (s. Abb. 21).

In Abb. 22 sind Doppelkristall-Rockingkurven von Czochralski-Siliziumkristallen dargestellt, die in unterschiedlicher Konzentration mit Bor dotiert und einer Wärmebehandlung unterzogen wurden [Ne 90]. Die Ergebnisse zeigen, daß im hochdotierten Material bei der Wärmebehandlung keine Versetzungsloops oder Stapelfehler gebildet werden und die  $\text{SiO}_2$ -Präzipitate größer sind als nach Standarddotierung.

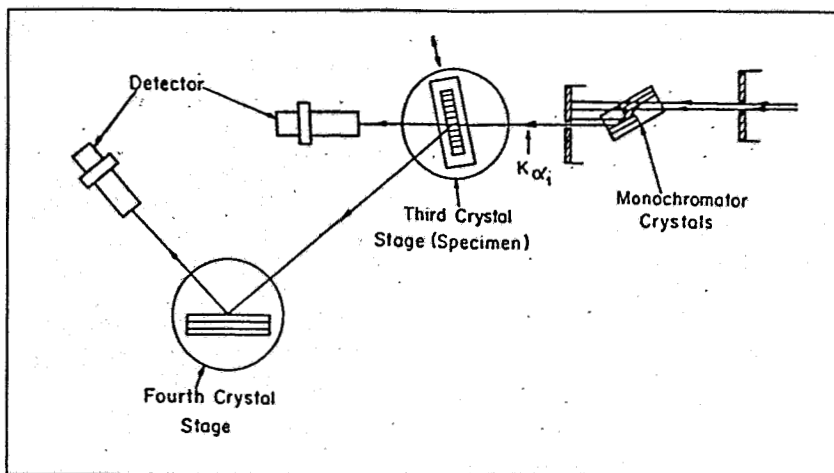


Abb. 21:  
Mehrkristall-Diffraktometer für hochauflösende Röntgendiffraktometrie [La 88]

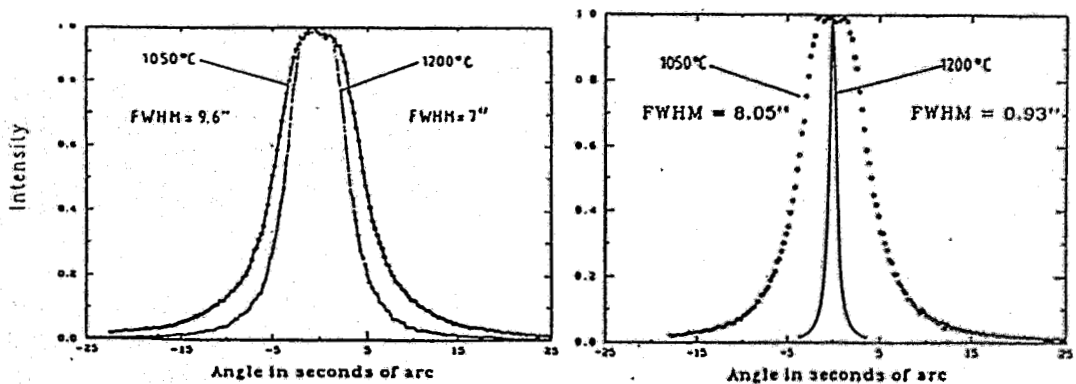


Abb. 22: (220)-Doppelkristall-Rockingkurve von bordotierten Czochralski-Siliziumkristallen nach Wärmebehandlung bei 1050 °C und 1200 °C. Die Borkonzentrationen betragen (a)  $1,7 \cdot 10^{14}$  B-Atome/cm<sup>3</sup> und (b)  $2,6 \cdot 10^{18}$  B-Atome/cm<sup>3</sup> [Ne 90].

Mit Mehrkristallinstrumenten können Intensitätsanteile, die aus perfekten oder nahezu perfekten Kristallteilen stammen nach den Gesetzen der dynamischen Diffraktionstheorie, und die in gestörten Bereichen gestreuten Anteile nach den Gesetzen der kinematischen Diffraktionstheorie experimentell getrennt registriert werden. Im Abb. 23 ist ein Beispiel für eine Siliziumscheibe dargestellt, die mechanisch geläppt, anschließend geätzt und danach 2,5 h in NaOH (pH $\approx$ 11) behandelt [Ha 89] wurde. Aus den Ergebnissen folgt, daß die alkalische Behandlung aus einer ursprünglich rauhen Oberfläche eine ebene und atomar glatte Oberfläche erzeugt.

Mit Mehrfachreflexionen an perfekten Kristallen in dispersiver und nicht-dispersiver Geometrie kann Strahlung hoher Monochromasie ( $4 \cdot 10^{-5} > \Delta E/E > 10^{-9}$ ) und geringer Divergenz ( $10^{-3}$  Bogensekunden) ausgesondert werden, die für höchstempfindliche Spannungstopographie (weitreichende Verzerrungs-



felder) genutzt werden kann. Ein derartiger Strahl kann auch für Untersuchungen der Ultra-Kleinwinkelstreuung eingesetzt werden.

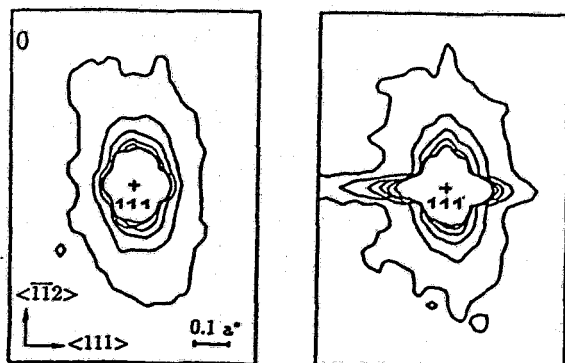


Abb. 23:  
Isointensitätslinien des (111)-  
Reflexes eines Siliziumkristalls  
mit (111)-Oberfläche. Die  
Kristallscheibe wurde geläppt,  
anschließend eine 125  $\mu\text{m}$   
dicke Schicht abgeätzt (a) und  
danach 2,5 h in NaOH ( $\text{pH}\approx 11$ )  
behandelt (b) [Ha 89].

### 3.8. Kleinwinkelstreuung

Kleinwinkelstreuung ist elastisch diffuse Streuung, die auf Grund der Größe der streuenden Objekte (lineare Ausdehnung von ungefähr 1 nm bis 100  $\mu\text{m}$ ) bei kleinen Streuwinkeln auftritt; allgemeiner ist sie ein Streueffekt, der bei kleinen Werten des Streuvektorbetrages ( $Q = 4 \pi \sin \theta / \lambda < 5 \text{ nm}^{-1}$ ,  $2\theta$  - Streuwinkel,  $\lambda$  - Wellenlänge der verwendeten Strahlung) beobachtet wird.

Aus einem Kleinwinkelstreuexperiment können unter Modellannahmen, die mit Ergebnissen anderer Untersuchungsmethoden gestützt sind, die Größe und die Größenverteilung sowie die Form und Volumenkonzentration von Materialinhomogenitäten (reine Dichteunterschiede wie Poren, Anhäufungen von Versetzungsschleifen oder unterschiedliche Zusammensetzung wie ausgeschiedene Partikeln) bestimmt werden. Bei Nutzung der anomalen Streuung sind außerdem Aussagen über ihre chemische Zusammensetzung möglich.

Die Experimente an einer Synchrotronstrahlungsquelle können einerseits bei einer festen Wellenlänge der einfallenden Strahlung ausgeführt werden, wobei dann strukturelle Prozesse im Echtzeitmodus verfolgt, kleinste Probenvolumina (wie einzelne Fasern) untersucht oder ultrahohe Auflösung erzielt werden können. Andererseits kann wegen des angebotenen kontinuierlichen Spektrums mit variabler Wellenlänge gearbeitet werden. Einige typische Anwendungsfälle sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Als Beispiel für Untersuchungen an kleinsten Proben ist in Abb. 24 das Ergebnis eines Kleinwinkelstreuexperimentes an einem nur 0,5  $\mu\text{m}$  dicken  $\alpha\text{-FeGdTb}$ -Sputterfilm gezeigt. Die Abb. 25 zeigt den zeitabhängigen Verlauf der Streuung bei kleinen Winkeln für ein Polymer unmittelbar nach der Streckung. Die ablaufenden strukturellen Änderungen sind deutlich sichtbar [Am 90].

Tabelle 1: *Beispiele für Materialinhomogenitäten, die in Kleinwinkelstreuexperimenten untersucht werden (nach [Ha 92])*

Kristalliner Zustand mit Gitterdefekten	1-, 2- und 3-dimensionale Agglomerate (Voids, Leerstellen, Zwischengitteratome, Substitutionsatome, Versetzungen, Loops, Strahlenschäden) Poly- und Nanokristalle
Chemische Nahordnung	Nahordnung in Legierungen
Konzentrationsfluktuationen	Thermische Fluktuationen in Legierungen, in der Nähe von Kongrenzen
Mehrphasengemische	Ausscheidungen in Legierungen, Dispersionen, Emulsionen
Mikrostrukturen	gesputterte oder aufgedampfte Schichten, Polymere, Kolloide, poröse Strukturen, Katalysatoren, Verbundwerkstoffe
Hohlräume	Mikrorisse, Kernspuren, Gasblasen

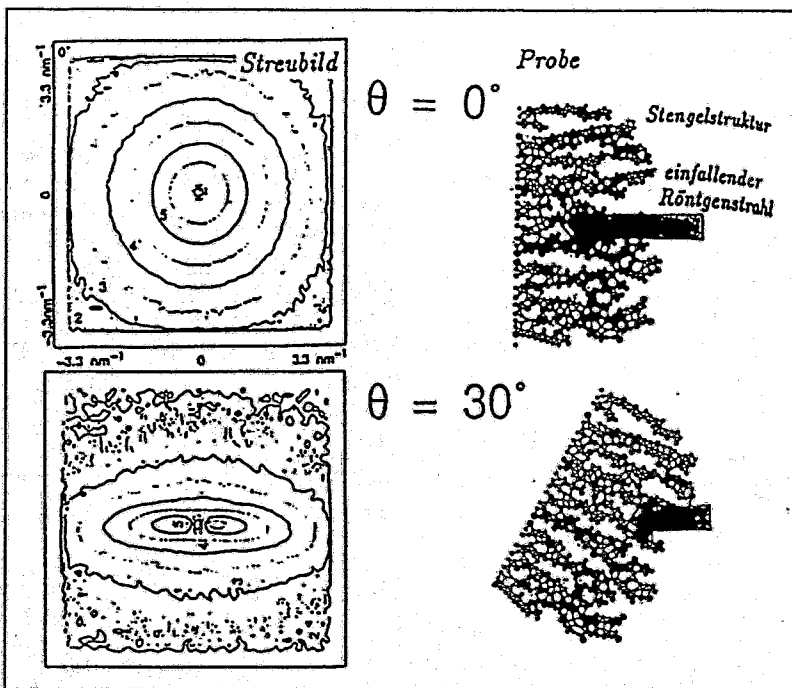


Abb. 24: Probenkippeffekte zum Nachweis der Stengelstruktur in einem 0,5  $\mu\text{m}$  dicken  $\alpha\text{-FeGdTb}$ -Sputterfilm. Bei senkrecht zur Detektorebene einfallendem Röntgenstrahl ist das Kleinwinkelstreubild isotrop. Bei verkippter Probe wird das Streubild anisotrop, da jetzt auch die Längsdimension der Stengel zur Streuung beiträgt.

### Anomale Kleinwinkelstreuung

Die energetische Durchstimbarkeit der Synchrotronstrahlung erlaubt es, die anomale Streuung der Röntgenstrahlung zu nutzen. In der Nähe der Absorptionskanten streuen die Elektronen der Atome mehr oder weniger in

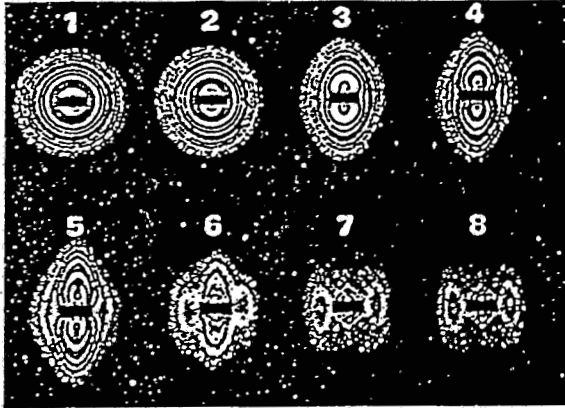


Abb. 25:  
Zeitaufgelöste Kleinwinkelstreuung von Polyethylen nach kurzer Streckung in horizontaler Richtung. Belichtungszeit 1s, Intervall zwischen den Belichtungen 1,5 s [Am 90].

Resonanz, was sich in einer Variation des Atomformfaktors widerspiegelt (siehe Pkt. 1). Damit wird es möglich, genauere Streukontrastanalysen durchzuführen und die Streubeiträge reiner Dichteinhomogenitäten von denen rein chemischer Inhomogenitäten abzutrennen. Abb. 26 demonstriert das Prinzip, wie durch anomale Streuung der Kontrast einer Ausscheidung erhöht werden kann.

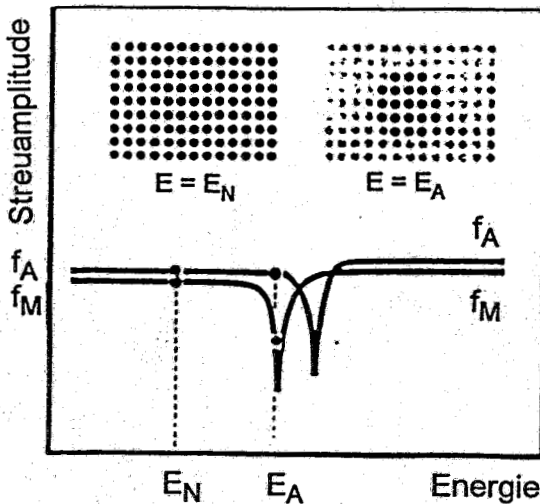


Abb. 26:  
Streukontrastverstärkung durch Nutzung der anomalen Streuung: Für ausgeschiedene Atome (Ordnungszahl  $Z_A$ ) in einer Matrix aus Atomen  $Z_M$  ist für eng im Periodensystem benachbarte Elemente der Streukontrast weitab der Absorptionskanten sehr klein (Energie  $E_N$ ). In Gebieten starker anomaler Streuung (Energie  $E_A$ ) wird er ausreichend groß, um z.B. Ausscheidungsvorgänge in den technisch wichtigen Fe-Cr-Ni-Legierungen untersuchen zu können [Ha 92].

Mit der intensiven Synchrotronstrahlung können auch Probleme der Ultra-Kleinwinkelstreuung ( $4 \cdot 10^{-5} > \Delta E/E > 10^{-9}$ , Streuwinkelgenauigkeit ungefähr 0,001 Bogensekunden) bearbeitet werden (Bonse-Hart-Kamera).

### 3.9. Mikrotomographie

Die Mikroradiographie und ihre Weiterentwicklung, die Mikrotomographie, ist eine Diagnostikmethode, deren Ziel der Nachweis von Inhomogenitäten und

Defekten (Risse, Gefügeinhomogenitäten, Verbundwerkstoffe) in mikroskopischen Dimensionen ( $\mu\text{m}$ -Bereich) ist. Physikalische Grundlage der Methode ist die unterschiedliche Schwächung, die ein Röntgenstrahl beim Durchdringen eines Stoffes erfährt. Für die Intensität des einfallenden ( $I_0$ ) und des das Material der Dicke  $d$  durchdringenden Strahles ( $I$ ) gilt die Beziehung

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu d)$$

Dabei ist  $\mu$  der sogenannte Schwächungskoeffizient, der von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung und von der chemischen Zusammensetzung und Dichte des absorbierenden Stoffes abhängt.

Stimuliert durch die Möglichkeiten der Elektronik und der Datenverarbeitung erfolgte die Weiterentwicklung der Radiographie zur Tomographie, d.h. der dreidimensionalen Rekonstruktion des zu untersuchenden Objektes als Ergebnis der mathematischen Bearbeitung der Daten einer Vielzahl zweidimensionaler Schichtaufnahmen (Absorptionsprofile).

Mit der Verfügbarkeit der Synchrotronstrahlung ergab sich für die Mikroradiographie eine entscheidende Ausweitung der Einsatzmöglichkeiten. Die Eigenschaften dieser Strahlung (kontinuierliches Spektrum großer Intensität, geringste Strahldivergenzen) ermöglichen Fehlererkennbarkeiten bis hinab zu  $1 \mu\text{m}$ . Moderne experimentelle Einrichtungen sind in der Regel für radiographische und tomographische Anwendungen ausgelegt.

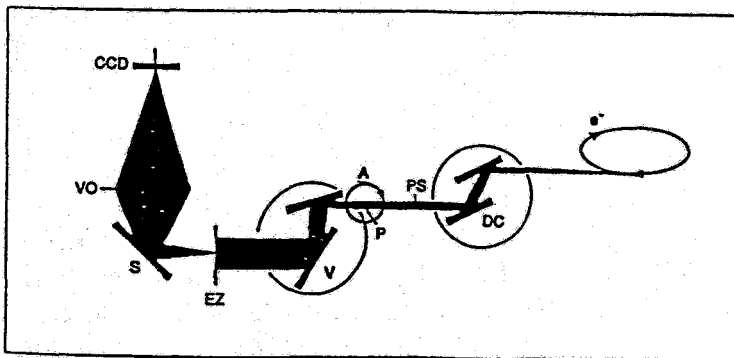


Abb. 27:  
Prinzipaufbau einer Mikro-  
tomographieanordnung mit  
Synchrotronstrahlung.  
Erläuterungen im Text

Abb. 27 zeigt den Prinzipaufbau einer derartigen Anordnung. Die Kombination der natürlichen Bündelung der Synchrotronstrahlung mit den röntgenoptischen Eigenschaften eines Idealkristall-Doppelmonochromators DC sorgt dafür, daß die Probe P von dem Parallelstrahl PS einer Wellenlänge durchstrahlt wird. Nach Reflexion an den Kristallen V zur Bündelaufweitung gelangt der Strahl auf einen Einkristallszintillator EZ. Über den Spiegel S und das Varioobjektiv VO kann dann von der CCD-Kamera die direkte digitale Aufzeichnung des zweidimensionalen Absorptionsprofils der Probe erfolgen. Dreht man die Probe P sukzessiv um die Achse A, wird eine Vielzahl von Projektionen gewonnen, aus denen durch tomographische Rekonstruktion das vollständige dreidimensionale Bild der Probe erzeugt wird. Der

Doppelmonochromator gestattet auf einfache Weise eine Variation der Wellenlänge, so daß eine den Absorptionsbedingungen der Probe angepaßte Kontrasteinstellung durch Ausnutzung der Wellenlängenabhängigkeit des Schwächungskoeffizienten an den Absorptionskanten möglich ist.

Moderne Anwendungsgebiete der Mikroradiographie und -tomographie finden sich in der Materialforschung und -prüfung sowie in der biologischen und medizinischen Forschung. Bei der Materialkontrolle konzentrieren sich die Untersuchungen vornehmlich auf solche Aufgaben, die der Defektkontrolle im Volumen des Werkstoffs gelten, wobei die Defekte im Grössenbereich von  $\mu\text{m}$  einzuordnen sind. Damit sind Produkte der Mikromechanik und moderne Werkstoffe, insbesondere Verbundwerkstoffe und deren gezielte Optimierung zunehmend Gegenstand der Untersuchungen. Abb. 28 zeigt die mikroradiographische Aufnahme des Querschnitts eines Cu-Röhrchens von 3,6 mm Durchmesser, das mit einer ca.  $3 \mu\text{m}$  dicken Ni-Folie umwickelt ist. Links ist der Querschnitt (hell:Cu, dunkel:Ni), rechts die dreidimensionale Rekonstruktion dargestellt [Bo 86].

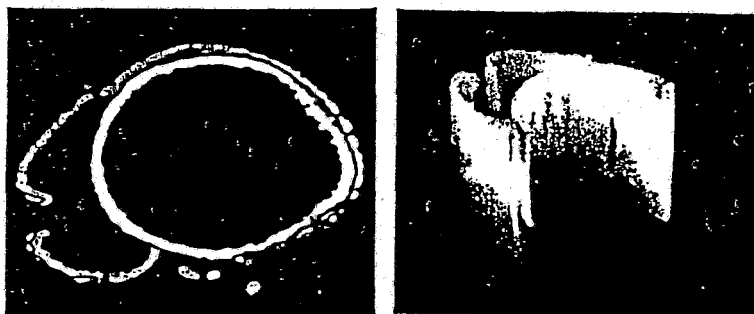


Abb. 28:  
Querschnitt eines Kupfer-Röhrchens von 3,6 mm Durchmesser umwickelt mit einer  $3 \mu\text{m}$  dicken Ni-Folie.  
Links Querschnittsbild; rechts dreidimensionale Rekonstruktion.

In modernen Verbundwerkstoffen werden zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften Fasern in die Matrix eingebaut. Abb. 29 zeigt röntgentomographische Schnitte durch einen Aluminium-Verbundwerkstoff. Er enthält  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Fasern von etwa  $5 \mu\text{m}$  Durchmesser und  $50-70 \mu\text{m}$  Länge sowie Ausscheidungen verschiedener Mischphasen. Fasern und Ausscheidungen verändern die Festigkeit und das plastische Fließverhalten. Im Bild sind Cluster von Fasern (dunkle Gebiete) und Ausscheidungen (helle Gebiete) zu erkennen. Durch systematische Änderung der Wellenlänge ist es möglich, die chemische Zusammensetzung der jeweiligen Phase aus der Abhängigkeit der Absorption von der Wellenlänge zu bestimmen. Eine weitere wichtige Information erhält man aus der Abbildung möglicher Mikrorisse, die bei einer mechanischen Beanspruchung entstehen können. Die beiden dargestellten Schnittbilder liegen parallel in einem Abstand von  $15 \mu\text{m}$ . Deutlich sind Änderungen der Struktur senkrecht zur Bildebene erkennbar. Der Durchmesser der Schnitte beträgt ca.  $1 \text{ mm}$  [Bo 86].

In einer Untersuchung [Ki 90] an einem Verbundwerkstoff aus C-SiC-Fasern in einer Al-Matrix wurden in mikrotomographisch rekonstruierten Quer- und Längsschliffe deutliche Mikrorißbildungen im Werkstoff nachgewiesen.

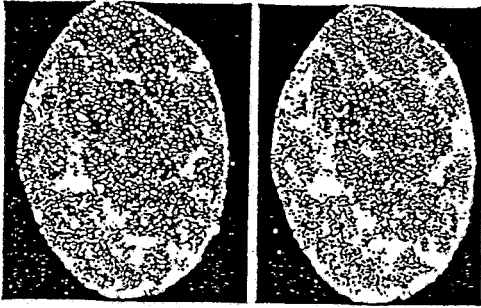


Abb. 29:  
Röntgentomographischer Schnitt durch einen Aluminium-Verbundwerkstoff mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Fasern (dunkle Gebiete).

Aufgrund der wesentlich verschiedenen Absorptionsbedingungen stellt die Neutronenradiographie und -tomographie eine Konkurrenzmethode dar, die jedoch wegen der Quellendimensionen nur Fehlererkennbarkeiten von minimal 0,5 mm zuläßt.

Synchrotronstrahlung wurde für diagnostische Zwecke in der medizinischen Forschung in den vergangenen Jahren in breitem Umfang eingesetzt (siehe z.B. [Di 92], [Bo 91], [En 89], [Bo 92]).

### 3.10. EXAFS- Spektroskopie

Die Grundzüge von EXAFS als einer Methode der Absorptionsspektroskopie wurden bereits in 2.2. dargestellt. Die typische Experimentanordnung ist in Abb. 30 wiedergegeben. Der Doppelmonochromator realisiert die notwendige schrittweise Änderung der Energie der Röntgenstrahlung zum Abtasten der Absorptionskante. Mit den 3 Ionisationskammern wird die Intensität vor und hinter Probe und Referenzmaterial gemessen, um daraus die Absorption

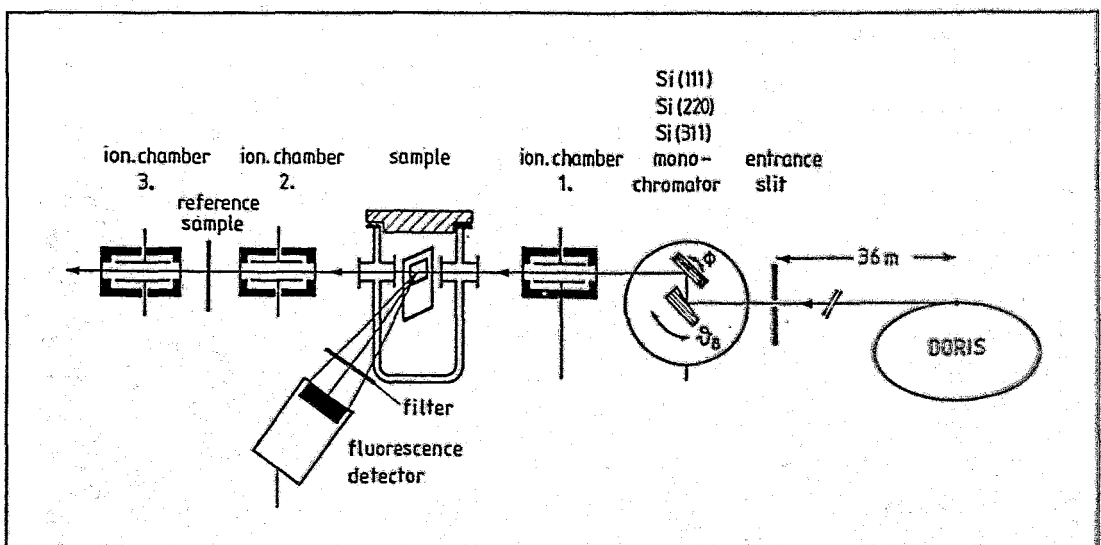


Abb. 30: Schematischer Aufbau eines Röntgenabsorptionsspektrometers.

berechnen zu können. Zusätzlich ist ein Fluoreszenzdetektor eingezeichnet. Im Falle von Proben mit starker Verdünnung der untersuchten Atomart oder sehr hoher Matrixabsorption oder auch bei Kanten im Bereich weicher Röntgenstrahlung ist es vom Effekt-Untergrund-Verhältnis oft günstiger statt des Transmissionssignals das Signal eines Sekundärprozesses auszuwerten. Der wichtigste Sekundärprozeß ist die Fluoreszenzstrahlung, die durch den Sprung eines äußeren Elektrons in ein Loch bei kernnahen Elektronenbahnen emittiert wird. Das Fluoreszenzsignal enthält eine dem Transmissionssignal analoge Information wird aber in den gesamten Raumwinkel ausgesandt und durch Vielfachdetektoranordnungen kann ein hohes Nutzsignal gewonnen werden. Die Hauptinformation von EXAFS bezieht sich auf die unmittelbare atomare Umgebung des benutzten Sondenatoms. Mit der Berechnung radialer Verteilungsfunktionen (gewichtete Fouriertransformation des normierten EXAFS-Signals) ist es möglich, Aussagen über den Abstand der Nachbaratome und ihre Anzahl zu erhalten. Die sogenannte Koordinationszahl ist proportional der Fläche unter den Maxima der radialen Verteilungsfunktion. Abb. 31 zeigt als Beispiel die Verteilungsfunktionen für kristallines und amorphes Germanium. Während man bei kristallinem Ge mehrere Maxima und damit Nachbarschalen deutlich unterscheiden kann, ist beim amorphen Ge nur die erste Nachbar-

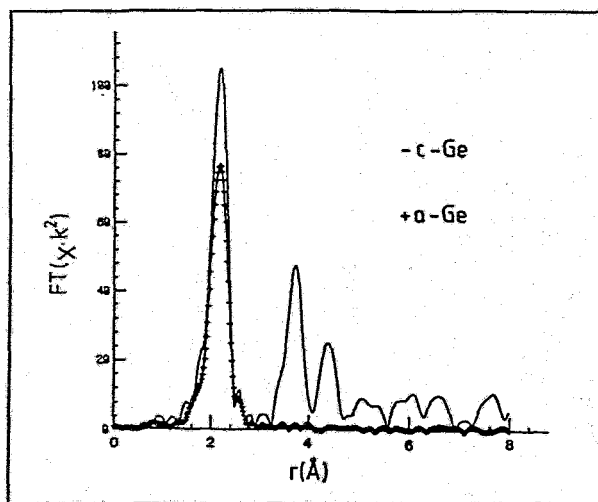


Abb. 31:  
Fouriertransformierte des EXAFS-Spektrums für amorphes (a-Ge) und kristallines Germanium (c-Ge) [Le 87]. Im c-Ge sind 8 Koordinationsschalen sichtbar im a-Ge dagegen nur die erste.

sphäre deutlich ausgebildet. Bereits in Abb. 14 war gezeigt, wie sich das Aussehen der Verteilungsfunktion beim Übergang von amorph zu kristallin ändert. Obwohl solche Aussagen nur einen räumlich begrenzten Einblick in die geometrische Struktur der Proben erlauben, sind sie für das Verständnis vieler Substanzen und Prozesse in ihnen nützlich. In Katalysatoren oder auch komplexen geologischen Proben interessiert oft die Verteilung von Kationen auf bestimmte Plätze. Dabei handelt es sich um Kationen, die je nach Wertigkeit oder wegen geringer Konzentration mögliche Positionen nur teilweise einnehmen. Aus diffraktometrischen Studien ist in der Regel die Umgebungsstruktur der in Rede stehenden Plätze (z.B. oktaedrische oder tetraedrische Umgebung) und damit die Zahl der Nachbarn bekannt. Die Absorptionmessung liefert durch die Bestimmung der Koordinationszahl des Sondenatoms die Zuordnung der Position und durch die Kantenlage auch die

Wertigkeit. Eine ähnliche Vorgehensweise läßt sich auch auf biologische Materialien übertragen, wenn man beispielsweise die Metallpositionen in Enzymen charakterisieren will.

Neben dem statischen Bild interessiert für die Erklärung von Umwandlungs- und Reaktionsprozessen zunehmend auch der Prozessablauf. Dazu soll es möglich sein *in situ* Messungen der Änderungen vorzunehmen. Typische Meßzeiten der "normalen" EXAFS sind 15 Minuten. Für den Verfolg kinetischer oder dynamischer Prozesse wurden deshalb Verfahren entwickelt, die eine wesentliche Meßzeitverkürzung gestatten. Als Repräsentanten dieser Verfahren seien Quick-EXAFS (QEXAFS) und die energiedispersive EXAFS (DEXAFS) genannt. Bei QEXAFS [Fr 89] werden die Monochromatorkristalle von Abb. 30 nicht schrittweise auf die nächste Energie gestellt, sondern quasikontinuierlich. Dabei wird der Energiebereich um die Absorptionskante in kurzen Meßzeiten (bis zu 5 sec. herunter) durchfahren und in dieser Zeit das Spektrum registriert. Es wird der experimentelle Aufbau des Standard-EXAFS-Verfahrens eingesetzt. Bei DEXAFS [Ha 91a] wird dagegen ein anderer Experimentaufbau wie in Abb. 32 gezeigt eingesetzt. Der Primärstrahl fällt auf

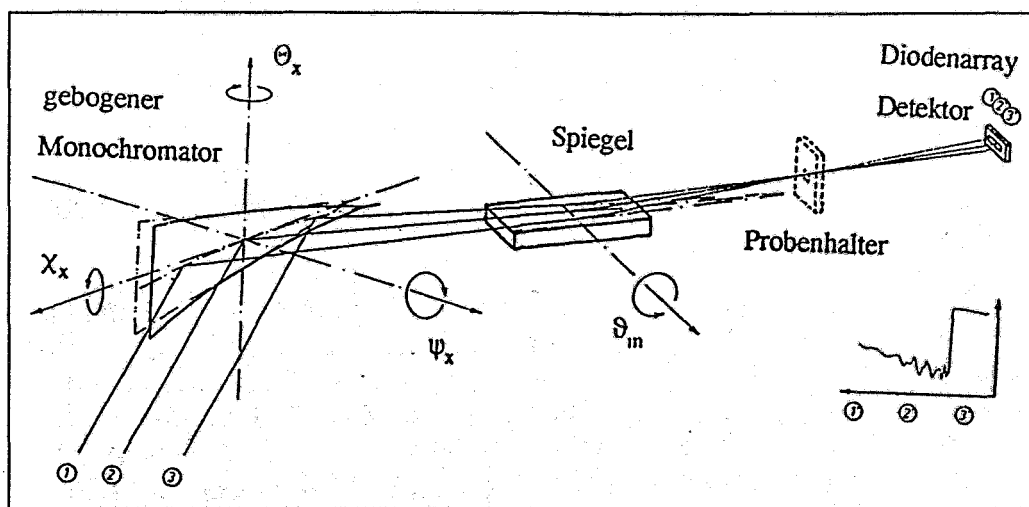


Abb. 32: Schema des Gesamtaufbaus eines DEXAFS-Spektrometers [Ha 91a]. Der Spiegel dient zur Unterdrückung der Harmonischen, die vom Monochromator mitreflektiert werden. Als Einsatz ist ein gemessenes Spektrum mit der Zuordnung der Bezugsenergien gezeigt.

einen gekrümmten Monochromatorkristall, der an verschiedenen Positionen (1-3) Röntgenstrahlung unterschiedlicher Energie ( $E_1$ - $E_3$ ) an die Probenposition reflektiert. Das Absorptionsspektrum wird mit einem ortsauflösenden Detektor gemessen, wobei jeder Detektorposition eine bestimmte Energie der Strahlung zugeordnet ist. Mit dieser Methode werden Zeitauflösungen bis in den ms-Bereich erreicht und man kann sie vorteilhaft zum Studium von Umwandlungsprozessen einsetzen. Diese Konfiguration läßt nur Transmissionsexperimente zu. Als Beispiel zeigt Abb. 33 die Änderungen der Bindungsverhältnisse von Kupfer in einen CuNaY-Zeolith bei der Reduktion mit Wasserstoff [Ha 91a]. Anfangs dominiert die Cu-O-Bindung während am Ende



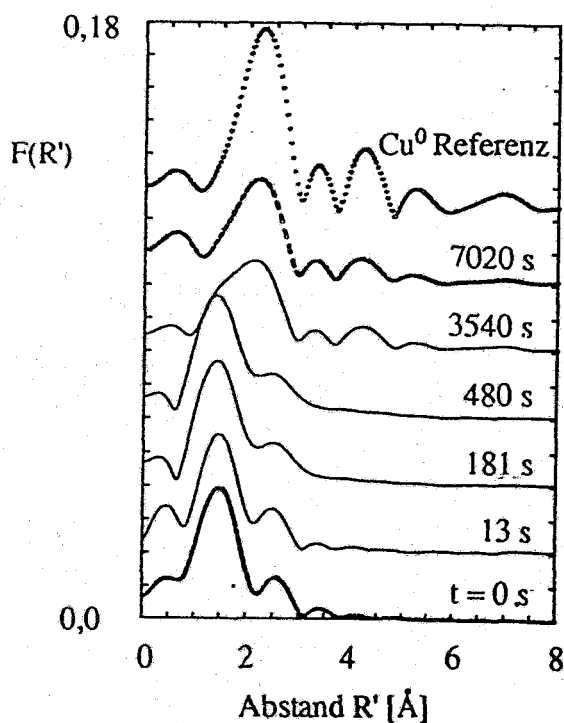


Abb. 33:  
Fouriertransformierte von EXAFS-Spektren an der Kupferkante aufgenommen während der Reduktion mit  $H_2$ ,  $H_2O$  bei 500 K [Ha 91a]. Der Übergang findet zwischen  $Cu^{2+}$  und  $Cu^0$  statt. Das erste Maximum gehört zum Cu-O-Abstand und das spätere Hauptmaximum zum Cu-Cu-Abstand.

überwiegend atomares Kupfer entsteht wie, der Vergleich mit dem Spektrum einer reinen Kupferfolie zeigt.

Die Eindringtiefe von Röntgenstrahlung ist bei den meisten Materialien so groß, daß man die Meßergebnisse als repräsentativ für Volumeneigenschaften betrachten kann. Interessieren dagegen primär Eigenschaften der Oberflächenschicht, so wird wie bei der Diffraktion die Technik des streifenden Einfalls des Röntgenstrahles im Bereich des Grenzwinkels der Totalreflexion  $\phi_c$  eingesetzt. Man spricht von surface-EXAFS (SEXAFS). Durch Variation des Einfallswinkels können Eindringtiefen von  $\mu m$  bis hinunter auf 20-70 Å realisiert werden. Im Falle starker Verdünnung des interessierenden Atoms und damit dominierender Matrixstreuung bedient man sich der Fluoreszenzstrahlung. Als Beispiel zeigt Abb. 34 die aus SEXAFS-Messungen berechneten partiellen Radialverteilungsfunktionen für Uran an der Oberfläche eines Glases das für den Einschluß nuklearer Abfälle eingesetzt wird [Gr 89]. Teilbild a gehört zum Probenvolumen und stammt aus einer EXAFS-Messung mit Einfallswinkel der Strahlung von  $45^\circ$ . Die Teilbilder b bis f resultieren aus Messungen an Uran bei einem Einfallswinkel von  $\phi_c/2$ . Dann wird eine Eindringtiefe von 40 Å erreicht. Teilbild b gehört zur frischen Oberfläche, während in den Teilbildern c-f die Korrosionseffekte durch längere Wassereinwirkung dargestellt sind. Bemerkenswert sind die deutlichen Änderungen in den Sauerstoffnachbarn (vorderer Teil des Spektrums), die in zwei Unterschalen bei 1,8 und 2,2 Å aufspalten. Das entspricht dem Uranylkomplex woraus folgt, daß Uran in dem Glas 6-wertig ist. Die Aufspaltung fehlt für das Volumenspektrum und interessanterweise auch für Spektrum d. Letzteres wurde aufgenommen

nachdem die Oberfläche trockengepumpt wurde. Aufmerksamkeit verdient weiterhin die Zahl der Uranatome, die an der Oberfläche größer ist als im Volumen. Das weist darauf hin, daß es zu einer Clusterbildung von Uranyleinheiten während der wässrigen Korrosion kommt. Diese Untersuchungen der chemischen Widerstandsfähigkeit von Glas zum Einschluß nuklearer Abfälle haben gezeigt, wie sich strukturelle Änderungen der Uran- und Eisen-Umgebung infolge fortschreitender Korrosion verfolgen lassen.

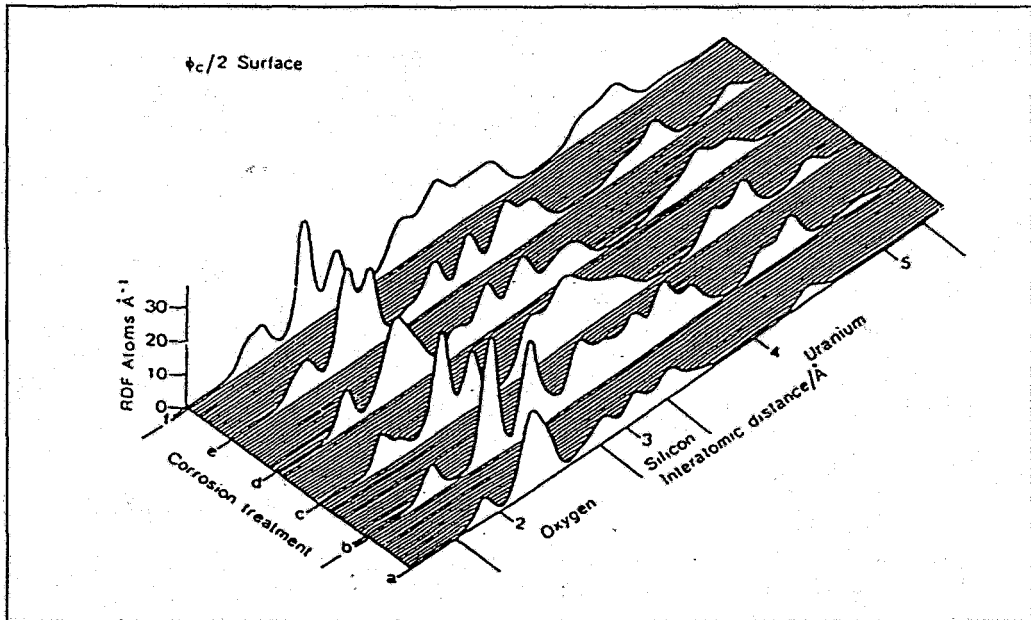


Abb. 34: Oberflächen-Radialverteilungsfunktionen um Uran in Glass (b-f) verglichen mit der Volumen-Radialverteilungsfunktion (a) [Gr 89]. Für Erläuterungen siehe Text.

## Literatur

- [Am 90] Y. Amemiya, *Synchrotron Radiation News* 3, 21 (1990)
- [Ba 85] R. Bachmann, H. Köhler, H. Schulz, H. Weber, *Acta Cryst.* A41, 35 (1985)
- [Ba 88] H.D. Bartunik, 'Crystal Structure Analysis of Biological Macromolecules by Synchrotron Radiation Diffraction', in M.A. Carrondo and G.A. Jeffrey (eds.), *Chemical Crystallography with Pulsed Neutrons and Synchrotron X-Rays*, pp.147-198, 1988, D.Reidel Publishing Company
- [Be 89] M. Bedzyk, G. M. Bommarito, J. S. Schildkraut, *Phys. Rev.Lett.* 62, 1376 -1379 (1989)
- [Bl 91] W. Blau, K. Richter, D. Meyer, S. Moldenhauer, P. Kizler, N. Mattern, M. Müller, *HASYLAB-Jahresbericht 1991*, 237
- [Bo 83] J. Bordas and E. Mandelkow, 'Time Resolved X-ray Scattering from Solutions Using Synchrotron Radiation' in R.I. Shalafi and S.M. Fernandez (eds.), *Fast Methods of Physical Biochemistry and Cell Biology*, 1983, Elsevier Science Publishers
- [Bo 86] U. Bonse, Q. Johnson, M. Nichols, R. Nusshardt, S. Kranicki, J. Kinney, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 246, 644 (1986)
- [Bo 91] U. Bonse, R. Nußhardt, F. Busch, R. Pahl, Q.C. Johnson, R.A. Savoyan, M.C. Nicos, *J. Mat. Sci.* 26, 4078 (1991)

- [Bo 92] U. Bonse, F. Busch, G. Delling, M. Hahn, W. Graeff, O. Günnewitz, R. Pahl, HASYLAB-Jahresbericht 1992, 559
- [Bu 81] H. J. Bunge, C. Esling, J. Appl. Cryst. 14 (1981) 889
- [Bu 89] R.C. Buschert, P.N. Gibson, W. Gissler, J. Haupt, and T.A. Crabb, J. Physique 50, Coll. C7-169 (1989)
- [Cr 91] W. Crostack u.a., HASYLAB-Jahresbericht 1991, 295
- [Di 92] W.-R. Dix, U. Engelke, W. Graeff, C. Hamm, J. Heuer, W. Kupper, M. Lohmann, B. Reime, R. Neumann, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 314, 307 (1992)
- [Do 91] H. Dosch, T. Hofer, J. Peisl, R.L. Johnson, Europhys. Lett., 15, 527 (1991)
- [En 89] K. Engelke, Mikrotomographie mit Synchrotronstrahlung zur quantitativen Darstellung des Mineralgehaltes in Knochen, PhD Dissertation, Universität Hamburg, 1989
- [Fr 89] R. Frahm, Rev.Sci.Instr. 60, 2515 (1989)
- [Fu 92] P.H. Fuoss, K.S. Liang, and P. Eisenberger in: Synchrotron Radiation Research, ed. R.Z. Bamach, Plenum Press, New York, 1992, vol.1, p. 385 (Übersicht)
- [Gr 89] G.N. Greaves, N.T. Barrett, G.M. Antonini, F.R. Thorley, B.T.M. Willis, and A. Steel J.Am.Chem.Soc. 111, 4313 (1989)
- [Ha 89] J.Harada, and N. Kashiwagura, Colloque de Physique, Tome 50 (1989), supplément au n° 10, Colloque C7 C7-129
- [Ha 89a] HASYLAB-Jahresberichte 1989-1991
- [Ha 91] M. Hart, Powder Diffraction Using Synchrotron Radiation, Proceedings of EPDIC 1, München, 1991, Materials Science Forum, 79-82, 447 (1991)
- [Ha 91a] M. Hagelstein, Zeitaufgelöste Röntgenabsorptionsspektroskopie zur Bestimmung der Oxidationsstufe und zur Untersuchung der strukturellen Umgebung von Kupfer in CuNaY-Zeolith während heterogener Reaktionen, Dissertation, Universität Kiel, 1991
- [Ha 92] H.-G. Haubold in: 23. IFF-Ferienkurs "Synchrotronstrahlung zur Erforschung kondensierter Materie", KFA Jülich 1992
- [Ka 85] J. Karle, Acta Cryst A41, 387 (1985)
- [Ka 91] K.K. Kadyrzhanov, N.F. Yugai, Yu.Zh. Tuleushev, S.V. Mytnichenko, Nucl. Instr. Meth. A 308, 308 (1991)
- [Ki 90] J. H. Kinney, S.R. Stock, M.C. Nichols, U. Bonse, T.M. Breunig, R.A. Savoyan, R. Nusshardt, Q.C. Johnson, F. Busch, S.D. Antonivich, Journ. Mater. Res. 5, 1123 (1990)
- [Kr 83] M. A. Krivoglaз, Theory of Scattering of X-Ray and Neutrons by Imperfect Crystals, Naukova Dumka, Kiev 1983
- [Ks 92] T. Kschidock, P. Klimanek, T. Wroblewski, HASYLAB-Jahresbericht 1992, 409
- [Kv 88] A. Kvik, 'Applications of Synchrotron X-Rays to Chemical Crystallography', in M.A. Corrondo and G.A. Jeffrey (eds.), Chemical Crystallography with Pulsed Neutrons and Synchrotron X-Rays, p. 197-212, 1988, D.Reidel Publishing Company
- [La 88] K. Lal, Crystal Properties and Preparation 16, 143 (1988)
- [Le 87] B. Lengeler, IFF-Bulletin 31, KFA Jülich, 1987
- [Ma 84] G. Materlik, J. Zegenhagen, Phys. Lett. A 104, 47- 50 (1984)
- [Ma 87] G. Materlik, 18. IFF-Ferienkurs 1987, KFA Jülich 1987, S. 21.1 - 21.12
- [Ma 90] E. Matsubara, K. Okuda, Y. Waseda, S.N. Okuno, and K. Inomata, Z. Naturforsch. 45a, (1990)
- [Mo 91] J.Moitz, HASYLAB-Jahresbericht 1991, 337
- [Ne 90] H. B. Neumann, J. R. Schneider, S. Gupta, S. Messoloras, R. J. Stewart, W. Zulehner, HASYLAB -Jahresbericht 1990, 393
- [Ni 86] F.F. Nielsen, P. Lee, and P. Coppens, Acta Cryst. A42, 359 (1986)
- [Pa 89] F. Paul, C. Biehl, R. Frahm, P. Rabe, Key Engineering Materials, 40&41, 245 (1990)
- [Po 79] B. Post, Acta Cryst. A34, 17 (1979)
- [Ri 88] W. Rieck, H. Euler, H. Schulz, W. Schildkamp, Acta Cryst. A44, 1099 (1988)
- [Ro 92] J.E. Rowe in: Synchrotron Radiation Research, ed. R.Z. Bamach, Plenum Press, New York, 1992, vol.1, p. 117 (Übersicht)
- [Sc 92] W. A. Schulze, H. J. Bunge, HASYLAB-Jahresbericht 1992, 413
- [St 88] H.B. Stuhmann, 'Chemical Crystallography with Pulsed Neutrons and Synchrotron Radiation' in M.A.Carrondo and G.A. Jeffrey (eds.), Chemical Crystallography with Pulsed Neutrons and Synchrotron X-Rays, pp. 357-378, 1988, D.Reidel Publishing Company

- [Te 88 ] D.H. Templeton and L.K. Templeton, *Acta Cryst.* **A36**, 237 (1980); *Acta Cryst.* **A41**, 133 (1985); *Acta Cryst.* **A42**, 478 (1986)
- [Wa 91] Y. Waseda, E. Matsubara, K. Sugiyama et al., Photon Factory, Activity Report 1991, 92
- [Wi 88] G. Will, Ch. Höffner und L. Doberitz, HASYLAB-Jahresbericht 1988, 109-110
- [Wi 89] G. Will, Crystal structure analysis from powder diffraction data, *Z. für Krist.* **188**, 169-186 (1989)

**Potentielle Nutzungsinteressen an einer  
Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung  
in Rossendorf  
durch Forschungseinrichtungen der Region**

Inhaltsübersicht

Vorbemerkung

A) Universitäten

1. Technische Universität Dresden
  - 1.1. Institut für Kristallographie und Festkörperphysik
  - 1.2. Institut für Anorganische Chemie
  - 1.3. Fakultät Maschinenwesen, Institut für Werkstoffwissenschaft
2. Universität Leipzig
  - 2.1. Fachbereich Chemie, AG Elektronen- und Röntgenspektroskopie
  - 2.2. Fachbereich Chemie, Institut für Kristallographie
  - 2.3. Fachbereich Physik, Abt. Nukleare Festkörperphysik
3. Technische Universität - Bergakademie Freiberg
4. Technische Universität Chemnitz-Zwickau

B) Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen

5. Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden
6. Institut für Polymerforschung Dresden
7. Institut für Oberflächenmodifizierung, Leipzig
8. Forschungszentrum Rossendorf
9. Fraunhofer-Einrichtungen
  - 9.1. FhE für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe, Dresden
  - 9.2. FhE für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik, Dresden

C) Forschungseinrichtungen Tschechiens und der Slowakei

D) Forschungsaktivitäten in Polen

## Vorbemerkung

Das Forschungszentrum Rossendorf arbeitet an einem Projektvorschlag für eine Synchrotronstrahlungsquelle, die im harten Röntgenbereich emittiert und für die Materialforschung dediziert sein soll. Die erste Fassung des Projektvorschlages [1] wurde aufgrund ausführlicher Diskussionen mit verschiedenen potentiellen Nutzern modifiziert und eine überarbeitete Version des Projektvorschlages wird demnächst vorgelegt werden. Die für den Nutzer vordergründig interessanten Parameter dieser Synchrotronstrahlungsquelle ROSY sind:

kritische Energie der Strahlung, $E_c$	8,4 keV
kritische Wellenlänge, $\lambda_c$	0,15 nm
natürliche Emittanz	$28,6 \pi$ nm rad
Elektronenenergie	3,0 GeV
Elektronenstrom	100 mA
Strahllebensdauer	6 h
Speicherringumfang	143 m
Plätze für Undulatoren und Wiggler	4 + 5

In der Brillanz im Röntgenbereich liegt diese Quelle etwa 2 Größenordnungen über DORIS (bei HASYLAB, Hamburg) und andererseits etwa um den gleichen Faktor unterhalb der ESRF (Grenoble).

Die Konzeption der Quelle orientiert sich ausdrücklich an einer Nutzung durch Gruppen der Materialforschung. Das ins Auge gefaßte Nutzungskonzept will deren Spezifik berücksichtigen, wo es oft bei den Experimenten mit Synchrotronstrahlung nicht um die Suche nach neuen Effekten, sondern um die Ausnutzung bekannter Effekte und Techniken zur systematischen Analyse von Werkstoffeigenschaften oder Änderungen letzterer geht. Dabei spielt auch die Notwendigkeit der Untersuchung großer Probenreihen eine Rolle, um die Synchrotronstrahlung als Arbeitsmethode großer Breite nützlich zu machen.

Zur Diskussion über die Nutzungsinteressen an einer solchen Synchrotronstrahlungsquelle haben das Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden und das Forschungszentrum Rossendorf Vertreter der Forschungseinrichtungen der Region am 15. und 16. 12. 1992 zu einem Arbeitstreffen eingeladen [2]. Zum Abschluß dieses Treffens wurden alle potentiellen Nutzer (Institute) einer Synchrotronstrahlungsquelle in Dresden gebeten, folgende 4 Fragen zu beantworten:

1. Begründung des spezifischen Interesses
  2. Abschätzung eigener künftiger Arbeiten und ihres Strahlzeitbedarfes, die bevorzugt an einer ROSY-Quelle durchgeführt werden würden
  3. Spezifische Anforderungen
  4. möglicher eigener Beitrag, insbesondere durch eigene Meßapparatur
- Die Antworten auf diese Fragen sind nachfolgend zusammengestellt.

Rossendorf, im März /Mai 1993

[1] ROSY - Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle, Vorschlag für die Errichtung einer Synchrotronstrahlungsquelle für die Materialforschung, verantwortliche Bearbeiter: W. Matz, D. Einfeld, FZR 92-10, Rossendorf, Juni 1992

[2] Arbeitstreffen "Nutzung einer zukünftigen Synchrotronstrahlungsquelle" Sammlung der Beiträge, Hrsg. W. Matz, FZR 93-03, Rossendorf, Januar 1993

## A) Universitäten

### 1. Technische Universität Dresden

#### 1.1. Institut für Kristallographie und Festkörperphysik

---

##### 1. Begründung des spezifischen Interesses

Viele Fragestellungen in der Festkörperphysik und Kristallographie lassen sich vorteilhaft mit Synchrotronstrahlungsexperimenten bearbeiten. Dabei wird, meist ausgehend von den herkömmlichen Röntgenmethoden, die Spezifik der Synchrotronstrahlung ausgenutzt, was sich hinsichtlich des Institutsinteresses in folgenden Punkten zusammenfassen läßt:

- Hoher primärer Photonenfluß in weiten Wellenlängenbereichen ermöglicht die Auswertung schwacher Reflexe und die Untersuchung kleinster Probenbereiche.
- Die Durchstimmbarkeit der Wellenlänge gestattet anomale Streuexperimente für die elementselektive Diffraktion und erleichtert eine Streuphasenbestimmung.
- Der hohe Polarisationsgrad läßt sich ausnutzen, um polarisationsabhängige EXAFS-Spektren zu gewinnen oder den Tensorcharakter der Atomformamplituden zu untersuchen.
- Die Verfügbarkeit weißer, nicht von monochromatischen Linien durchsetzter, Primärstrahlung ist wesentliche Voraussetzung für Untersuchungen zur zeitaufgelösten Strukturanalyse.

##### 2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes

Das Institut hat Interesse, eigene Arbeiten auf dem Gebiet der Synchrotronstrahlungsdiffraktometrie an Pulvern und Einkristallen durchzuführen. Hinzu kommen Untersuchungen an Dünnschichtobjekten unter streifendem Einfall der Synchrotronstrahlung, wobei das Diffraktionssignal, das reflektrometrische Signal und das Fluoreszenzsignal verwertet werden.

Der abgeschätzte Strahlzeitbedarf pro Projekt und Aspirant liegt in der Größenordnung von 15-25 Tagen/Jahr.

##### 3. spezielle Anforderungen

Das Institut widmet den Untersuchungen zur Strukturanalyse an Absorptionskanten und zur EXAFS-Spektroskopie unter Ausnutzung der Polarisation besondere Aufmerksamkeit.

#### **4. möglicher eigener Beitrag**

Das Institut hat die Absicht, Meßapparaturen

- zur Mikro-Laue-Technik mit zweidimensionalem Detektor mit wahlweiser Ausnutzung poly- und monochromatischer Strahlung und
- zur EXAFS-Spektroskopie unter Ausnutzung der Strahlungspolarisation im Rahmen von Forschungsprojekten aufzubauen. Sinnvollerweise werden diese Aufbauten und der entsprechende Meßbetrieb mit Graduierungsarbeiten zu verknüpfen sein.

### **1. 2. Institut für Anorganische Chemie**

---

#### **1. Begründung des spezifischen Interesses**

Im Institut für Anorganische Chemie werden u. a. Untersuchungen zum Bildungsmechanismus komplexer Oxide aus naßchemisch präparierten Precursor-Verbindungen durchgeführt. Aus Kenntnis der Bildungsprozesse sollen Beziehungen zwischen Natur des Precursors, Reaktionsbedingungen und Produktionseigenschaften im Hinblick auf eine gezielte Beeinflussung ergründet werden. Darüber hinaus ist die genaue Kenntnis von Strukturdetails, wie durch die komplexe Zusammensetzung bedingte Mikroheterogenitäten in ihrem Bezug zu Eigenschaften, von hohem Interesse.

Die Darstellung der komplexen Oxide aus den naßchemisch präparierten Precursors verläuft in der Regel über amorphe bzw. strukturell stark gestörte Intermediate. Dabei sind neue Erkenntnisse zur Veränderung der Nahordnung und des Oxidationszustandes bestimmter Ionen beim Übergang zum kristallinen Produkt von Interesse.

Darüber hinaus gibt es Hinweise, daß röntgenographisch einheitlich erscheinende Produkte Mikroheterogenitäten aufweisen, die erst bei höherer Temperatur "homogenisiert" werden.

Zu beiden Sachverhalten könnten Experimente mit Synchrotronstrahlung (EXAFS, XANES), insbesondere in Kombination mit anderen Untersuchungsmethoden, neuartige und sowohl aus wissenschaftlicher als auch praktischer Sicht interessante Ergebnisse liefern. Möglicherweise müßten die dabei ablaufenden Ordnungsvorgänge ebenfalls durch Pulverdifraktometrie mittels Synchrotronstrahlung erfaßt werden, wenn diese abhängig von der Temperatur mit so hoher Geschwindigkeit ablaufen, daß die Phasenumwandlungen mit Röntgenstrahlung nicht mehr meßbar sind.

#### **2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes**

Ziel zukünftiger Untersuchungen sind Beiträge zur Beschreibung der Umordnungsvorgänge beim Übergang vom amorphen zum kristallinen Zustand bzw. von molekularen Spezies über Sol-Gel-Intermediate zu kristallinen Produkten



an komplexen Oxiden insbesondere mit Spinell- und Perowskitstruktur. Am Beispiel der Bildung von Ferriten mit Spinellstruktur (Mn-Zn-Ferrit, Ni-Zn-Ferrit) sollen Aussagen zur Änderung der Nahordnung der Kationen vom chemisch präparierten Precursor nach Zersetzung bei minimaler Temperatur zum kristallinen Produkt mit Hilfe von EXAFS-Experimenten gewonnen werden. Bei Mn-Zn-Ferriten interessiert darüber hinaus die mit Platzwechselfvorgängen einhergehende Veränderung der Oxidationsstufe des Mangans, welche mittels XANES-Experimenten vorteilhaft untersucht werden könnte.

Aus mößbauerspektroskopischen Untersuchungen sind Schlußfolgerungen auf eine inhomogene Kationenverteilung in kristallinen Ferriten mit Spinellstruktur mit einer charakteristischen Temperaturabhängigkeit möglich. Zu deren weiteren Aufklärung sind ebenfalls EXAFS-Experimente von hohem Stellenwert.

Im Rahmen von Untersuchungen an komplexen Oxiden mit Perowskitstruktur vom Typ  $(A, A')(B, B')O_3$  interessieren uns Fragen einer eventuellen inhomogenen Verteilung auf "molekularer Ebene" im Sinne einer Herausbildung von bevorzugten  $ABO_3$ - und  $A'B'O_3$ -Bereichen in Abhängigkeit von der Temperatur ( $A, A'$ =Erdalkalimetall, Pb;  $B, B'$ =Nb, Ta, Fe und anderen 3d-Elemente). Bei der Bildung der Perowskite tritt meist intermediär oder auch irreversibel eine Pyrochlorphase auf. Welche Ionen dabei bevorzugt in die Pyrochlorphase gehen und welche eventuell direkt an der Perowskitbildung beteiligt sind, ist unklar. Infolge der ungünstigen Einflüsse von Fremdphasen auf die dielektrischen Eigenschaften der Perowskite ist die Aufklärung derartiger Zusammenhänge von hohem Interesse. Dazu könnten EXAFS-Experimente ebenfalls wichtige Beiträge liefern.

Für die kurz dargestellten Vorhaben, welche langfristigen Charakter tragen, wäre die Verfügbarkeit einer Synchrotronstrahlungsquelle im Territorium von hohem Interesse. Dies gilt insbesondere auch im Hinblick auf den hohen Auslastungsgrad verfügbarer Quellen (z. B. HASYLAB).

Im Zusammenhang mit der Realisierung der voranstehenden Vorhaben wäre ein jährlicher Meßzeitbedarf von etwa 10 Tagen erforderlich (2/3 für EXAFS, 1/3 für XANES). Dazu kommt ein gegenwärtig nicht quantifizierbarer Bedarf an einem Meßplatz für Pulverdiffraktion.

### **3. spezielle Anforderungen**

Spezifische Anforderungen an die Meßplätze werden aus unserer Sicht nicht gestellt. Sie sollten als Standardversuchsaufbauten konzipiert sein, die von einem Team betreut werden und auch langfristig reproduzierbare und damit miteinander vergleichbare Meßergebnisse ermöglichen. Es müßten vorzugsweise pulverförmige Festkörperproben und evtl. auch Festkörperfilme untersucht werden.

Wünschenswert sind Messungen in einem Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und etwa 1000°C, wobei die Temperatur auf ca. 10 K genau einregelbar ist und Möglichkeiten zur Einstellung einer definierten Gasatmosphäre (z. B. Stickstoff, Sauerstoff, definierte Partialdrücke, ggf. Vakuum) bestehen.

#### **4. möglicher eigener Beitrag**

Eigene Beiträge zum Bau von Meßapparaturen sind nicht vorgesehen. Es wird vollständig auf die Nutzung installierter Meßeinrichtungen orientiert.

### **1.3. Fakultät für Maschinenwesen, Institut für Werkstoffwissenschaft**

---

#### **1. Begründung des spezifischen Interesses**

Im Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden werden u. a. folgende Forschungsaufgaben bearbeitet, zu deren Lösung der Einsatz entsprechender Meßplätze am Synchrotron nützlich wäre:

- a) Herstellung von Werkstoffen über mechanisches Legieren und Charakterisierung der dabei im Mikroskopischen abgelaufenen Prozesse (EXAFS-Messungen; ortsaufgelöste röntgenographische Phasenanalyse in Bereichen unter 5  $\mu\text{m}$ , d. h. Röntgenmikrodiffraktometrie)
- b) Herstellung von Werkstoffen über Fest- bzw. Flüssigphasensintern und Nachweis der Phasenbildung durch in situ Hochtemperaturdiffraktometrie mit möglichst hoher Zeitauflösung (<1 s)
- c) Werkstoffentwicklung zur Verringerung der Kerb- und Reißempfindlichkeit bei zyklischer Belastung, Bruchforschung (Messung der Eigenspannung an ausgesuchten Stellen der kompakten Proben mit einem Durchmesser < 50 $\mu\text{m}$ , z. B. an der Reißspitze und in der Reißumgebung)
- d) Herstellung von Magnetlegierungen (z. B. FeNiCo) mit spezieller Hystereseschleife und Untersuchung des Einflusses von Zusatzelementen auf die Rekristallisation (Abbildung der Bewegung von Korngrenzen durch "in situ"-Topographie mit weißer intensiver Röntgenstrahlung, Wechselwirkung der Korngrenzen mit Ausscheidungen bzw. Konzentrationsanreicherungen der Zusatzelemente)
- e) Anfertigung von KOSSEL-Aufnahmen mit weißer bzw. kantennaher Röntgenstrahlung (Phasengrenzidentifizierung in Diffusionszonen über Beugungsdiagramme mit gleichzeitiger Ermittlung der Eigenspannung bzw. Versetzungsdichte).
- f) Entwicklung "gradiertes Werkstoffe" - Röntgentomographie zur Abbildung des Porenverlaufs in Filterwerkstoffen

#### **2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes**

Die Aufgaben a)-d) und f) sollten von unseren Mitarbeitern, die die entsprechenden Probleme bearbeiten, an den von anderen Instituten entwickelten und betreuten Meßplätzen der ROSY-Quelle durchgeführt werden.

Der Strahlzeitbedarf wird im ersten Nutzungsjahr bei insgesamt 40 Stunden liegen und dürfte sich bei positivem Ausgang der Experimente auf 200 Stunden in den folgenden Jahren einpegeln.

#### 4. möglicher eigener Beitrag

Für die Aufgabe e) planen wir, einen eigenen Meßplatz aufzubauen, wenn ein in Vorbereitung befindliches DFG-Projekt genehmigt wird. Die Entscheidung für unsere aktive Mitarbeit auf diesem Gebiet können wir deshalb zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht treffen.

## 2. Universität Leipzig

### 2.1. Fachbereich Chemie

#### AG Elektronen- und Röntgenspektroskopie

---

#### 1. Begründung des spezifischen Interesses

Die Arbeitsgruppe ist *methodisch* orientiert und nutzt Methoden der Elektronenspektroskopie (XPS, AES) und der hochauflösenden Röntgenspektroskopie (XANES, EXAFS). Mit diesen Methoden werden in der *Grundlagenforschung* Erkenntnisse gewonnen zu Elektronenkonfiguration und chemischer Bindung in anorganischen und organischen Molekülen und Festkörpern, zur Wechselwirkung von Atomen und Molekülen mit Festkörperoberflächen, zur elektronischen Struktur von Adsorbatschichten und zum Informationsgehalt von Photoelektronen- und Augerelektronenspektren bei der Charakterisierung von Oberflächen.

In der *angewandten Forschung* werden Untersuchungen zu Adsorptionsprozessen, zur Flotation in Stoffaufbereitung und Umwelttechnologie sowie Oberflächen- und Grenzflächenanalysen von mikro- und optoelektronischen Bauelementen, Tiefenprofil- und Grenzflächenanalysen von Halbleiter-Schichtsystemen und von beschichteten Gläsern vorgenommen.

Das Interesse an Experimenten mit Synchrotronstrahlung ergibt sich aus folgenden laufenden Arbeiten bzw. Vorhaben:

- Hochauflösende Photoemissionsuntersuchungen zu Grenzflächenreaktionen und Diffusion in Metallschichten auf III-V-Halbleitern (Ti, Pt, Au, Au/Be auf GaAs, InP und GaInAsP), Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Grenzflächenreaktion Metall-Halbleiter und der Rolle von Diffusionsbarrieren.
- Untersuchung von Oxidschichten auf InP(100)-Oberflächen, Bestimmung des Aufbaus und der Zusammensetzung dünnster Oxidschichten anhand energieabhängiger XPS-Messungen und eingehender Untersuchung der chemischen Verschiebungen.
- Untersuchungen zur Tiefenauflösung von Konzentrations-Tiefenprofilen in Halbleiter-Heteroübergängen

- Untersuchungen zur molekularen Adsorption an Sulfiden und Oxiden, Einfluß der veränderten Substratoberfläche auf die Adsorption, Aufklärung des Wechselwirkungsmechanismus von Substrat mit Adsorptiv.
- Charakterisierung von Ladungsverteilung und Struktur an Übergangsmetallverbindungen mit XPS, XANES und EXAFS, Untersuchung von Verbindungen mit ungewöhnlichen Elektronenverteilungen.

## 2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes

- Charakterisierung koordinierter Spezies der 3d-Elemente in ungewöhnlichen Valenz- und Koordinierungszuständen, Struktur und Eigenschaften neuartiger polymerer Materialien (z. B. Metall-Komplexe mit Pyrrolsequenzen).
- Röntgenabsorptionsanalyse von Komplexverbindungen, Einflüsse von Multiplettaufspaltung, Ligandenfeld, Elektronentransfer und Mehrfachstreuung auf die K- und L-Absorption.
- Untersuchung der chemischen Bindung von Phosphor und Schwefel in Feststoffen und an Oberflächen mit Photo- und Augerelektronenspektroskopie, Anwendung des Auger-Parameterkonzepts, Aufklärung von Koordinationseinflüssen in dünnsten Oberflächenschichten und Clustern auf unterschiedlichen Substraten.
- Untersuchung an Halbleiterschichtsystemen mit Materialien von Typ  $AlIII B^V$  und  $AlII B^VI$  zum Bindungsverhalten insbesondere der Elemente Phosphor und Schwefel sowie zum Reaktions- und Diffusionsverhalten dieser Schichtsysteme mit Metall- und Isolatordeckschichten, Aufnahme der Konzentrations-Tiefenprofile mit verschiedenen Methoden.
- Aufklärung von Reaktionsmechanismen mit XPS an Sulfid- bzw. Oxidoberflächen, die bei Oxidation, Aktivierung mit Metallionen und Komplexierung mit schwefel- und stickstoffhaltigen Verbindungen eine Rolle spielen.
- Charakterisierung niederdimensionaler Strukturen auf der Basis von  $AlIII B^V$ -Halbleitern.
- Charakterisierung modifizierter Materialpulver, Bestimmung des Aufbaus und der Zusammensetzung dünner Deckschichten, insbesondere von Stoff- und/oder Strukturgradienten mit Hilfe von energieabhängigen XPS-Messungen und
- Identifizierung kovalenter Bindungen zwischen anorganischen Nanometerpartikeln und anorganischen Substraten
- Charakterisierung von Katalysatoren unter reaktiven Bedingungen

Gesamtstrahlzeitbedarf: 16 Wochen

## 3. spezielle Anforderungen

Für XANES-, EXAFS- und Photoemissionsexperimente werden 3 Monochromatorbereiche in folgenden Energiebereichen benötigt:

1. 50 - 200 eV
2. 200 - 2000 eV
3. 2 - 20 keV

Für Flugzeittechnik und zeitauflösende Messungen sollte sowohl Single- als auch Multibunchbetrieb vorgesehen werden.

Für die meisten Experimente ist Wiggler- bzw. Undulatoreinsatz zweckmäßig.

#### **4. möglicher eigener Beitrag**

HBFG-Antrag für Meßapparatur für Absorptionsspektroskopie (UHV-Kammer, Elektronenspektrometer einschließlich Fluoreszenzdetektor) ist vorgesehen.

## **2.2. Fachbereich Chemie, Institut für Kristallographie**

---

### **1. Begründung des spezifischen Interesses**

Am Institut für Kristallographie, Mineralogie und Materialwissenschaft der Universität Leipzig wird Ausbildung im Diplomstudiengang Mineralogie betrieben. Dazu gehört Forschung auf relevanten Gebieten der Kristallographie und der Technischen Mineralogie. Für das Gebiet der Kristallographie können die Anforderungen an eine Synchrotronstrahlungsquelle den Ausführungen beim Institut für Kristallographie der TU Dresden entnommen werden.

Die Gruppe Technische Mineralogie befaßt sich z. Z. mit Umweltproblemen, wie der Entsorgung von festen umweltbelastenden Rückständen aus Verhüttungsprozessen oder Nutzbarmachung von Braunkohlefilteraschen für Bauzwecke. Die röntgenographische Phasenanalyse ist dabei eine wesentliche Arbeitsmethode. Der Vielzahl an Komponenten in diesen Abprodukten ist die konventionelle Technik der röntgenographischen Phasenanalyse nicht gewachsen und liegt in der Nachweisgrenze der Phasen deutlich (mehrere Zehnerpotenzen) unter den modernen chemischen Analysemethoden der Elemente oder Ionen. Diese Lücke kann durch den Einsatz einer Synchrotronstrahlungsquelle geschlossen werden, denn erst die Zuordnung eines chemischen Elements zu einer Verbindung gibt Aufschluß über dessen Schädlichkeit.

Braunkohlefilteraschen können in Gegenwart von Wasser fest werden. Dieser Mechanismus ist aufzuklären. Gute Ergebnisse bringen die konventionellen Verfahren der röntgenographischen in-situ-Messungen für die Langzeitveränderungen. Die wesentlichen Vorgänge in den ersten Minuten, die durch pH-Wert- und kalorische Messungen belegbar sind, können konventionell nicht erfaßt werden und belegen die Notwendigkeit leistungsfähiger Strahlenquellen.

### **2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes**

Der Bedarf würde bei ca. 100 Messungen/a liegen.

### **3. spezielle Anforderungen**

Anschluß eines leistungsfähigen Pulverdiffraktometers mit ortsauflösendem Detektor.

## **2.3. Fachbereich Physik, Abt. Nukleare Festkörperphysik**

---

### **1. Begründung des spezifischen Interesses**

Interesse an der Untersuchung von NEXAFS und EXAFS an Cu in Cu-Proteinen sowie an Cd- und Mg-Derivaten. Zum Teil werden die Messungen an der K-Kante, zum Teil an der L-Kante durchgeführt. Die projektierten Parameter der Quelle ( $E=3$  GeV,  $I = 100$  mA,  $\lambda_C = 0.15$  nm) sind für die beabsichtigten Experimente gut geeignet. Unsere bisherigen Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit einer Gruppe am LURE/Orsay (Flank, Cortés) durchgeführt. Langfristig ist eine Verlagerung an näherliegende Synchrotronstrahlungsquellen, wie z. B. ROSY, geplant.

### **2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes**

Strahlzeitbedarf: ca. 5 Shifts á 8 h/Vierteljahr; zu Beginn etwas weniger.

### **3. spezielle Anforderungen**

Fluoreszenzspektroskopie

### **4. möglicher eigener Beitrag**

Bislang steht keine eigene Meßapparatur zur Verfügung.

## **3. Technische Universität - Bergakademie Freiberg Fachbereich Werkstoffwissenschaft**

### **1. Begründung des spezifischen Interesses**

Die Materialforschung an der TU Bergakademie Freiberg wird in der Zukunft durch folgende Schwerpunkte gekennzeichnet sein, bei deren Lösung der Einsatz von Synchrotronstrahlung vorteilhaft oder sogar von grundlegender

Bedeutung wäre:

- Herstellung, Struktur und Eigenschaften heterogener Volumenwerkstoffe und Schichten
- Ein- und vielkristalline Elektronikwerkstoffe auf der Basis von Halbleiter- und Keramikmaterialien,
- Grundlagen und Methodik der Werkstoffdiagnostik und -analytik an Metallen und Legierungen, keramischen Materialien und Kunststoffen,
- Entwicklung bzw. Vervollkommnung von Technologien der Werkstoff-fertigung und -technik

Spezielle Aufgabenstellungen für die effektive Anwendung von Synchrotronstrahlung sind in diesem Zusammenhang z. B.

- Strukturanalyse an Einzelkristalliten
- Untersuchungen des Verformungsverhaltens (Orientierungsänderungen, Eigenspannungszustand, Versetzungsinhalt) von Einzelkristalliten in ein- und mehrphasigen Kristallitverbunden,
- Gefügeanalyse (Phaseninhalt, Textur, Eigenspannungen) an dünnen Schichten,
- Untersuchungen von Gefüge- und Subgefügeinhomogenitäten (z. B. Textur- oder Spannungsgradienten in dünnen Schichten),
- Untersuchungen des Bruchverhaltens von zähen Werkstoffzuständen (Gefüge- und Subgefügeausbildung in der Umgebung von Rißspitzen usw.)

Zur Realisierung der skizzierten Arbeiten werden neben dem Fachbereich Werkstoffwissenschaft auch die Fachbereiche Physik, Chemie sowie Metallurgie und Werkstofffertigungstechnologie der TU Bergakademie Freiberg beitragen. In der Perspektive wird deshalb auch in diesen Fachbereichen zunehmender Bedarf an der Nutzung von Synchrotronstrahlung entstehen. Ein wichtiges Anliegen der werkstoffwissenschaftlichen Applikation von Synchrotronstrahlung wird darin gesehen, diese Sonde in der Perspektive nicht nur bei innovativen Forschungsarbeiten, sondern auch als Standardmethode der (wissenschaftlichen) Festkörper- bzw. Werkstoffanalytik nutzen können.

## 2. Abschätzung des Strahlzeitbedarf

Unter der Voraussetzung, daß die personelle und finanzielle Entwicklung der Werkstoffforschung an der Bergakademie Freiberg einen regulären Verlauf nimmt, wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt eingeschätzt, daß die unter Pos. 1 skizzierten Forschungsarbeiten etwa

- 0.5 Meßplatz hochauflösende Vielkristalldiffraktometrie,
- 0.25 Meßplatz Eigenspannungs- und Texturanalyse,
- 0.25 Meßplatz Dünnschichtdiffraktometrie,
- 0.1 Meßplatz Einkristalldiffraktometrie und
- 0.1 Meßplatz Festkörperspektroskopie

beanspruchen könnten.

### **3. spezielle Anforderungen**

Um die Vorteile der Synchrotronstrahlung voll nutzen zu können, wäre aus der Sicht der Werkstoffforschung an der TU Bergakademie Freiberg die Verfügbarkeit folgender Methoden wünschenswert:

- hochauflösende Einkristalldiffraktometrie (Doppel- oder Dreikristallspektrometrie) zur Analyse von Defektstrukturen in realen Einkristallen bzw. Einzelkristalliten von grobkörnigen Vielkristallen,
- hochauflösende Vielkristalldiffraktometrie für die Strukturanalyse, Präzisionsgitterkonstantenbestimmungen und die Untersuchung von Gitterfehlordnung,
- orts- und tiefenaufgelöste Textur- und Eigenspannungsanalyse,
- Dünnschicht-Diffraktometrie,
- Echtzeit-Diffraktometrie zur Untersuchung der Kinetik von Struktur- und Phasenumwandlungen,
- Festkörperspektroskopie (EXAFS, Mößbauerspektroskopie) mit Synchrotronstrahlung

### **4. möglicher eigener Beitrag**

Der Fachbereich Werkstoffwissenschaft der TU Bergakademie Freiberg ist grundsätzlich bereit, sich im Rahmen seiner finanziellen und personellen Möglichkeiten am Aufbau bzw. der Ausrüstung von Meßapparaturen für die Vielkristalldiffraktometrie zu beteiligen. Die Bearbeitung der unter Pos. 1 und 2 skizzierten Forschungsprobleme soll durch Doktoranden und wissenschaftliche Mitarbeiter vorgenommen werden. Außerdem bestehen der Wunsch und die Bereitschaft, mit ROSY zu einer kontinuierlichen Kooperation im Rahmen der studentischen Ausbildung (Praktika und Diplomarbeiten) zu kommen.

## **4. Technische Universität Chemnitz-Zwickau**

### **1. Begründung des spezifischen Interesses**

Die Material- und Werkstoffforschung gehört an der TU Chemnitz-Zwickau auch in Zukunft zu den tragenden und profilbestimmenden Elementen der Forschung. Neben technologisch bzw. für unmittelbare Anwendung interessanten Fragestellungen sind grundlagenorientierte Forschungen zum Verständnis des kondensierten Zustandes der Stoffe zunehmend von Bedeutung. Die gegenseitige Beeinflussung physikalischer, chemischer und materialwissenschaftlicher Aufgabenstellungen wird angestrebt.

Folgende Hauptlinien der Forschung in dieser Richtung werden mittel- bzw. langfristig verfolgt:

- Dünnschichtforschung
- Flüssige Metalle und Legierungen/Phasenübergänge
- Verbundwerkstoffe.



Die Aufklärung der atomaren Struktur (Kristallstruktur, Phasenanalyse, Nahordnungsverhältnisse, Ordnung mittlerer Reichweite) und der elektronischen Struktur (Bindungsverhältnisse, Bandstruktur) sowie der Grobstruktur (Verbunde, mehrphasige Schichtsysteme) ist für die erfolgreiche Bearbeitung dieser Forschungsrichtungen von zentraler Bedeutung. Insbesondere die nachfolgend genannten strukturbezogenen bzw. spektroskopischen Techniken sollten dabei unter Einsatz von Synchrotronstrahlung genutzt werden.

#### *Diffraktometrie*

- Energie- und/oder winkeldispersive Beugung zur Aufklärung der Nahordnung in Element- und Legierungsschmelzen sowie amorphen und nanokristallinen Stoffen. Besondere Bedeutung kommt hierbei der anomalen Röntgenbeugung zu, um partielle Strukturfunktionen in mehrkomponentigen flüssigen und amorphen Legierungssystemen bestimmen zu können.
- Phasenanalyse in dünnen Schichten
- Energiedispersive Beugung für "zeitaufgelöste" Beugungsexperimente zur Verfolgung der Ausbildung und Kinetik von Mikroentmischungsvorgängen, der Phasenseparation in monotektischen Legierungen sowie von Vorstadien der Phasenumwandlung flüssig - fest
- Hochauflösende Beugungsexperimente insbesondere an Schichten und Schichtoberflächen

#### *Textur- und Spannungsmessungen*

Die Ermittlung innerer Spannungen sowie herstellungsbedingter Texturen in dünnen Schichten sind notwendig für das Verständnis des Verlaufes des Abscheidungsprozesses und damit für dessen Optimierung.

#### *Kleinwinkelstreuung*

Kleinwinkelexperimente werden benötigt für das Studium der Ordnung mittlerer Reichweite (Assoziatbildung), für die Untersuchung der Konzentrations- und Temperaturabhängigkeit der Präformierung und des Ablaufes von Phasenübergängen (flüssig - flüssig in monotektischen Legierungen, flüssig - fest).

#### *EXAFS/XANES*

Elementspezifische Untersuchung der Nahordnung (Triplettkorrelationsfunktion) in amorphen bzw. nanokristallinen Schichten

#### *Fluoreszenzanalyse*

Interface-Analyse in Verbundwerkstoffen (Kontamination), Elementanalyse an inneren Grenzflächen

#### *Tomographie*

Grobstruktur von Verbundwerkstoffen (Faser- und Schichtverbunde) und von mehrphasigen Schichtsystemen

Die skizzierten Meßaufgaben werden außer vom Fachbereich Physik auch von den Fachbereichen Chemie und Werkstoffkunde auszuführen sein.

## 2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes

- Strukturaufklärung (totale und partielle Strukturfunktionen) an flüssigen und amorphen Legierungssystemen: 4 Wochen / Jahr
- Zeitaufgelöste Beugungsexperimente zur Aufklärung von Mikroentmischungsvorgängen, der Phasenseparation in monotektischen Legierungssystemen und der Phasenumwandlung flüssig-fest: 3 Wochen / Jahr
- Untersuchungen von Schichten (Phasenanalyse, Spannungs- und Texturmessungen): 3 Wochen / Jahr
- Kleinwinkelstreuung: 3 Wochen / Jahr
- EXAFS / XANES: 1 Woche / Jahr

## 3. spezielle Anforderungen

- Für die Weitwinkelbeugungsexperimente ist ein maximaler Impulsübertrag  $>20 \text{ \AA}^{-1}$  erforderlich. Die minimale Wellenlänge sollte daher nicht größer als  $0,4 \text{ \AA}$  sein.
- Um die anomale resonante Streuung nutzen zu können, sollte die Wellenlänge der Röntgenstrahlung zwischen  $0,4 \text{ \AA}$  und  $2,0 \text{ \AA}$  wählbar sein.
- Für die Messungen an Schmelzen sind Hochtemperatureinrichtungen sowohl für Weit- als auch für Kleinwinkelstreuung erforderlich.

## 4. möglicher eigener Beitrag

Der Fachbereich Physik wird sich am Aufbau von Meßplätzen beteiligen. Dies betrifft insbesondere Einrichtungen zu Untersuchungen bei hohen Temperaturen (Hochtemperaturkammern) und für zeitaufgelöste Experimente (ortsempfindlicher Detektor) sowie einschlägige Software zur Behandlung der Meßdaten von nichtkristallinen Materialien und Dünnschichtsystemen. Die Meßaufgaben werden durch Mitarbeiter, Doktoranden und Diplomanden wahrgenommen. Wünschenswert wäre auch, das Arbeiten mit Synchrotronstrahlung in bestimmte Bereiche der studentischen Ausbildung zu integrieren.

## B) Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen

### 5. Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

---

#### 1. Begründung des spezifischen Interesses

Im Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V. werden Grundlagenuntersuchungen zur Entwicklung neuer bzw. verbesserter Materialien durchgeführt.

Die moderne Werkstoffforschung erfordert umfassende Kenntnisse über den strukturellen und elektronischen Aufbau der Materialien und über die Zusammenhänge zu Darstellung und zu den physikalischen Eigenschaften. Die interessierenden Werkstoffe werden in ihrem strukturellen, chemischen und elektronischen Aufbau immer komplizierter, so sind heterogene Systeme mit niedriger Kristallsymmetrie, amorphe Phasen, nanokristalline Materialien, dünne Schichten, Grenzflächen, Schichtsysteme Gegenstand der Grundlagenforschung zur Materialentwicklung.

Mit dieser Entwicklung werden zunehmend höhere Anforderungen an die Analytik gestellt, neben vertieftem Eindringen in die atomare und elektronische Struktur sind das auch Direktbeobachtungen der Struktur bei Darstellungsprozessen sowie von Struktur-Eigenschaftsbeziehungen.

Synchrotronstrahlung kann wegen der einzigartigen Eigenschaften dabei ganz wesentliche Beiträge liefern.

Für die Bearbeitung folgender Arbeitsgebiete des IFW wird die Anwendung von Synchrotronstrahlung als erforderlich angesehen:

#### *- Strukturbestimmung mittels hochaufgelöster Pulverdiffraktometrie und unter Nutzung der anomalen Dispersion von keramischen Werkstoffen*

Die meisten Werkstoffe sind polykristallin. Synchrotronstrahlung bietet wegen der hohen Intensität und Kollimation die Möglichkeit, hochaufgelöste Pulverdiagramme zu erhalten, mit denen detaillierte Strukturuntersuchungen möglich sind. Durch die Hocho Auflösung wird der Informationsgehalt der Röntgenbeugungsdiagramme so erhöht, daß auch niedrig symmetrische Kristallstrukturen und Kristalle mit großen Gitterperiodizitäten einer Strukturbestimmung zugänglich werden. Symmetrieänderungen, die mit sehr geringen Verzerrungen der Gitterrichtung verbunden sind, wie z. B. bei Phasenübergängen in Ferroelektrika, sind nur mittels Synchrotronstrahlung erfaßbar.

Analog zur Einkristallstrukturanalyse kann durch Nutzung der anomalen Dispersion eine Unterscheidung der Besetzung von Positionen mit Atomen auch bei geringeren Unterschieden in der Ordnungszahl erreicht werden.

#### *- Untersuchung von Prozessen der Phasenbildung und der Phasentransformation mittels temperatur- und zeitaufgelöster Diffraktometrie an metallischen Legierungen und keramischen Materialien.*

Die Synchrotronstrahlung bietet wegen ihrer hohen Strahlintensität die Möglichkeit der in situ-Beobachtung struktureller Änderungen in Materialien.

Statt Meßzeiten von Stunden bei konventionellen Röntgenexperimenten (die bei Verwendung von ortsempfindlichen Detektoren auf Minuten reduziert werden können), lassen sich die Meßzeiten bei Verwendung von Synchrotronstrahlung auf Sekunden bis  $\mu$ s verringern. Synchrotronstrahlung eröffnet damit die Möglichkeit der in-situ-Beobachtung struktureller Änderungen in Materialien. Gekoppelt mit Hochtemperatur-, Tieftemperatur-, Reaktions- oder Druckkammer lassen sich zeitaufgelöste Prozesse der Phasenbildung und der Phasentransformation direkt beobachten.

*- Analyse der lokalen Nachbarschaft in komplexen Materialien und dünnen Schichten mittels EXAFS, auch in Reflexion und Fluoreszenz*

An Multikomponentensystemen ist es oft schwierig bzw. unmöglich, die Beiträge der einzelnen Atomsorten im Beugungsexperiment zu separieren. Mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie (EXAFS, XANES) kann selektiv die lokale Umgebung der energetisch ausgewählten Atomsorte analysiert werden. Da die Oszillationen in der Nähe der Absorptionskante nur durch die Nahordnung bestimmt werden, sind sowohl kristalline als auch amorphe Legierungen mit dieser Methode zugänglich. Röntgenabsorptionsspektroskopie wird sinnvoll nur mit Synchrotronstrahlung gemessen (Meßzeitreduktion von Tagen im Labor  $\rightarrow$  15 min.).

*- Strukturanalyse an ungeordneten Materialien*

Amorphe Substanzen, Schmelzen, Polymere u. a. ungeordnete Materialien liefern meist diffuse Streudiagramme mit geringer Intensität. Mittels Synchrotronstrahlung bei Verwendung kurzer Wellenlängen (0,2 Å) lassen sich die Streuintensitäten bis zu hohen k-Werten ( $\sin\theta/\lambda$ ) messen und damit eine hohe Auflösung im Ortsraum erzielen, was für die Diskussion und Unterscheidung von Strukturmodellen wesentlich ist. Die anomale Streuung bietet die Möglichkeit, partielle Paarkorrelationsfunktion zu bestimmen und damit Aussagen über die chemische Nahordnung zu erhalten.

*- Analyse der Struktur dünner Schichten und Schichtsysteme mittels Beugung bei streifendem Einfall*

Röntgenbeugung, Röntgenfluoreszenz und Röntgenabsorption werden im Gebiet der Totalreflexion (mrad!) inhärent oberflächenempfindlich. Unter Verwendung von Synchrotronstrahlung wird es möglich, die atomare Struktur von Oberflächen, Monolagen, Untersuchung von Phasenübergängen an der Oberfläche, Schmelzen der Oberfläche, Kristallwachstum, chemische Reaktionen der Oberfläche u. a. zu untersuchen.

Die Totalreflexion kann benutzt werden, um den Brechungsindex von Materialien im Röntgenbereich zu bestimmen, um Aussagen über die Dichte der Oberflächen zu erhalten. Die Rauigkeit von Oberflächen, Schichtdicken und Rauigkeiten von Einzelschichten und Schichtfolgen lassen sich aus der Analyse des Fresnel-Verhaltens der Streukurven erhalten. Mittels Oberflächen-EXAFS können Aussagen über die Nahordnung in der Oberflächenschicht von einigen nm erhalten werden. Die Anwendung von stehenden Wellentechniken gestatten Aussagen über die atomare Anordnung von Monolagen auf Einkristallsubstraten. Bei diesem Experiment wird das Wellenfeld durch die Oberfläche bewegt und sekundär ausgelöste Fluoreszenzstrahlung oder Elektronen analysiert.

## 2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes

- Hochaufgelöste Röntgenbeugung	2 Wochen/Jahr
- Hoch-/Tieftemperatur in situ Messung	4 Wochen/Jahr
- Dünne Schichten	4 Wochen/Jahr
- EXAFS	1 Woche /Jahr
- Strukturanalyse ungeordneter Systeme	2 Wochen/Jahr

## 3. spezielle Anforderungen

- Wellenlänge  $\lambda$  zwischen 0,1 und 2 Å durchstimmbar
- Lebensdauer  $> 8$  h
- Brillanz  $> 10^{15}$  phot / mm<sup>2</sup> mrad<sup>2</sup> sec 0,1%BW

## 4. möglicher eigener Beitrag

- Instrumentierung einer Beamline  
(Pulverdiffraktometer für Hoch-/Tieftemperaturmessung)

## 6. Institut für Polymerforschung Dresden

---

### 1. Begründung des spezifischen Interesses

Bei der Strukturaufklärung polymerer Werkstoffe haben Röntgenstreuexperimente eine große Bedeutung erlangt. Ausgehend von den Aufgabenschwerpunkten des Institutes für Polymerforschung (IPF) ist die Aufklärung des thermischen und zeitlichen Strukturverhaltens neuentwickelter und verarbeiteter Polymerwerkstoffe, einschließlich Faserproben, insbesondere

- das Erwärmungs- und Abkühlverhalten im Temperaturbereich von -200...600°C
- thermisch induzierte Strukturänderungen oder Phasenumwandlungen
- das thermische und zeitliche Relaxationsverhalten der Proben

von Interesse. Die Messungen werden in der Regel in Transmission durchgeführt, wobei die Gesamtmeßzeit pro Probe und Experiment zwischen 1 und 4 Stunden betragen kann.

Das IPF betreibt ein eigenes Röntgenfeinstrukturlabor. Zur Ergänzung der eigenen WAXS/SAXS-Meßtechnik ist es an der Nutzung externer Meßplätze, insbesondere von *simultanen Meßanordnungen mit Synchrotronstrahlung*, interessiert. Durch den Querschnittscharakter der Analytikabteilung variieren die anfallenden Analysenaufgaben, so daß künftig neben temperaturabhängigen Untersuchungen an Polymeren auch Messungen der Abhängigkeit

von anderen physikalischen Parametern (z.B. Spannungsuntersuchungen an Spritzgußteilen) sowie die Kombination verschiedener Analysenmethoden notwendig sein werden.

Von den Methoden stehen die Röntgenweitwinkelstreuung (WAXS, Diffraktion) und die Röntgenkleinwinkelstreuung (SAXS) im Vordergrund, wobei dynamische Experimentführungen zur in-situ-Erfassung von Änderungen wesentlich sind.

## **2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes**

Das IPF ist an der Nutzung eines kombinierten WAXS/SAXS-Meßplatzes zur Untersuchung von Polymerwerkstoffen interessiert. Mit ihm sollen Streuexperimente in Transmission und im Temperaturbereich von etwa -200 bis 600°C möglich sein. Desweiteren besteht Interesse an Texturuntersuchungen an Fasern oder Spritzgußteilen (überblicksmäßig).

Der gegenwärtig abschätzbare Meßzeitbedarf für Strukturuntersuchungen beträgt etwa 1 Monat / Jahr.

## **3. spezielle Anforderungen**

Für den winkeldispersiven Diffraktionsmeßplatz (kombinierter SAXS/WAXS-Meßplatz) ist die Verfügbarkeit eines ein- und/oder zweidimensionalen ortsempfindlichen Detektors wünschenswert.

Es besteht ein prinzipielles Interesse am Einsatz eines Diffraktometers mit energiedispersivem Detektor (EDX) für in-situ-Experimente an Polymeren. Überlegungen zum notwendigen Energiebereich der Strahlung für einen solchen Aufbau führen dazu, daß die maximale an Ablenkmagneten bei ROSY nutzbare Energie zu niedrig liegt, so daß bei den gegenwärtigen Parametern von ROSY solch ein Meßplatz nicht befürwortet wird. Falls durch den Einsatz von Hochfeldwiggeln eine Verschiebung des Angebotsspektrums zu höheren Energien (Bereich > 15 keV) möglich wird, besteht Interesse an der Nutzung eines EDX-Meßplatzes.

## **4. möglicher eigener Beitrag**

Das IPF ist bereit, sich am Aufbau eines Meßplatzes unter der Voraussetzung zu beteiligen, daß die Finanzierung über eingeworbene Projektmittel erfolgen kann.

## 7. Institut für Oberflächenmodifizierung, Leipzig

---

Die Interessen des Institutes für Oberflächenmodifizierung bei der Anwendung von Synchrotronstrahlungsmethoden werden im Rahmen der Zusammenarbeit von anderen Gruppen (Universität Leipzig, Universität Bonn) wahrgenommen. Auf dem Gebiet der Röntgenabsorptionsspektroskopie ist es die AG Elektronen- und Röntgenspektroskopie im Fachbereich Chemie der Universität Leipzig. Von dieser Gruppe gibt es eine ausführliche Darstellung der Interessenfelder im Abschnitt 2.1.

Für die Zukunft konzipiert das Institut Arbeiten auf dem Gebiet der Nanometerstrukturen, die in einem SFB eingebunden sein sollen. In diesem Feld sollte die Nutzung der Synchrotronstrahlung für die Mikrostrukturierung einen wesentlichen Platz einnehmen.

## 8. Forschungszentrum Rossendorf

---

Das Forschungszentrum Rossendorf ist in die 5 wissenschaftlichen Institute für

- Ionenstrahlphysik und Materialforschung
- Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie
- Radiochemie
- Kern- und Hadronenphysik
- Sicherheitsforschung

untergliedert. Die drei erstgenannten Institute haben ein starkes Interesse daran, Zugang zu Synchrotronstrahlungsexperimenten zu erhalten. Die Methoden und Themenbereiche des Interesse sind verschieden, so daß die Aussagen für jedes Institut einzeln erfolgen müssen. Das Institut für Kern- und Hadronenphysik hat primär Interesse daran, daß der Injektor so gestaltet wird, daß Kern- und Strahlungsphysik mit einem hochbrillanten Elektronenstrahl im Energiebereich um 250 MeV durchführbar wird. Im Institut für Sicherheitsforschung wird die Abteilung Neutronenversprödung für Materialuntersuchungen Synchrotronstrahlungsmethoden einsetzen.

### 1. Begründung des spezifischen Interesses

#### *Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung*

Das Institut befaßt sich mit der Modifizierung von Oberflächen und oberflächennahen Schichten mittels Ionenstrahltechniken. Aufgaben der Entwicklung von Materialien, die spezifischen Anwendungszwecken optimal angepaßt sind, können vielfach durch die Beeinflussung von Oberflächeneigenschaften oder die Erzeugung spezieller Oberflächenstrukturen gelöst werden. Für Funktionswerkstoffe genügt es oft, elektrische, magnetische oder optische

Eigenschaften, die Träger der gewünschten Funktion sind, nur in einem oberflächennahen Bereich einzustellen. Bei Konstruktionswerkstoffen stehen die Verringerung von Verschleiß oder Reibung oder die Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit im Vordergrund. Mit Ionenstrahlen können die genannten Werkstoffbereiche durch Implantation oder Ionenstrahlgestützte Schichtabscheidung gezielt modifiziert werden. Dabei spielt das Verständnis der Prozesse der Gitterschädigung, der Phasenbildung und ihrer Vorstadien (Präzipitatbildung und -wachstum) oder des Schichtwachstums eine wesentliche Rolle für die gezielte Beeinflussung der Prozeßführung mit Ionenstrahlen. Für das Studium dieser strukturellen Vorgänge sind Synchrotronstrahlungstechniken sehr wertvoll.

Das Gemeinsame der am Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung untersuchten dünnen Schichten an der Oberfläche oder kurz darunter ist, daß sie ein sehr geringes Volumen darstellen. Die geringen Mengen Probenmaterials haben Intensitätsprobleme bei der Arbeit an Laborröntgenröhren in zweierlei Hinsicht zur Folge. Einerseits ist es die geringe Menge streuender Atome an sich und andererseits wird zur Hervorhebung des Streuanteils der Oberflächenschicht die Methode des streifenden Einfalls des Röntgenstrahls benutzt, die eine starke Strahlkollimation erfordert und dadurch die Intensität reduziert.

Die Synchrotronstrahlung verbindet hohe Strahlintensität mit einer sehr guten natürlichen Kollimation der Strahlung, so daß sich aus dieser Sicht entsprechende Experimente an Dünnschichtsystemen anbieten. Hinzu kommen Eigenschaften wie kontinuierliches Spektrum (Möglichkeit der Energievariation z.B. für Kontrastverstärkung) und natürliche Polarisierung.

Methodisch sind Experimente zur Phasenanalyse, zur Texturierung der Schichten, zur Kleinwinkelstreuung an Präzipitaten und zur EXAFS-Spektroskopie notwendig. Ziel ist es in-situ-Experimente zum Studium des Schichtwachstums bei Ionenbestrahlung aufzubauen.

#### *Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie*

Das Institut befaßt sich mit radioaktiven Tracern für die Medizin. Der zentrale Ansatzpunkt ist der Zusammenhang zwischen Moleküleigenschaften und dem Verhalten der Moleküle in Biosystemen. Dazu ist eine physikalisch/chemische Molekülcharakterisierung essentiell, was die Verfügbarkeit leistungsfähiger radiochemischer, elektrochemischer, spektroskopischer u.a. Analysemethoden voraussetzt. In diesem methodischen Spektrum ist auch die Synchrotronstrahlung von Interesse, da in speziellen Fällen die Präzision konventioneller Röntgenstrukturanalytik nicht ausreichend ist oder wenn wegen der äußerst geringen Substanzmengen bzw. Konzentrationen der Tracer der Nachweis mit anderen Methoden problematisch ist.

Die zu untersuchenden Moleküle sind sowohl organische Verbindungen als auch Koordinationsverbindungen der Elemente Technetium, Rhenium, Ruthenium, Platin, Vanadium, Titan oder Bor.

Das spezifische Interesse konzentriert sich somit auf die Strukturanalyse mit



Klein- und Weitwinkelstreuung und die Röntgenabsorptions-Spektroskopie (EXAFS, XANES) mit Hilfe der Synchrotronstrahlung. In Kombination mit anderen Analysenverfahren (NMR, ESR, Massenspektroskopie) gestatten sie die Bestimmung relevanter struktureller Parameter (z.B. Bindungswinkel, Abstände, Strukturverzerrungen, Definition der 1. Koordinationssphäre des Metalls) sowohl in festen (nichtkristallinen) Proben als auch in Lösungen.

### *Institut für Radiochemie*

Das Institut beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Untersuchung der Grundprozesse des Transportes von metallischen Schadstoffen in geologischen und hydrologischen Medien auf molekularer Ebene. Diese grundlegenden Erkenntnisse der Flüssigkeits-, Oberflächen- und Festkörperchemie werden angewandt für Fragen Umweltsanierung. Das Institut für Radiochemie will sich insbesondere auch Radionukliden allgemein und Aktiniden im besonderen zuwenden. Hier ergeben sich unmittelbare Anwendungsbezüge zum Problem der Remediation von WISMUT-Gelände aber auch zum Problem der Lagerung des nuklearen Abfalls.

Es gibt eine Anzahl verschiedener Untersuchungsmethoden, die im Labor zur Aufklärung der molekularen Vorgänge bei der Radionuklidadsorption verwendet werden können wie ESR, NMR, FTIR oder Raman-Spektroskopie. Während der letzten Jahre hat die Methode der Röntgenabsorptions-Spektroskopie (XAS) zunehmende Verwendung in der Erforschung von Adsorptionsprozessen an Oberflächen gefunden. Zur Anwendung dieser Technik wird monochromatische Röntgenstrahlung benötigt, die mit Hilfe eines Synchrotrons erzeugt wird. Die zunehmende Verfügbarkeit von Synchrotronstrahlung mit guter Intensität steht deshalb in direktem Zusammenhang mit der rapiden Zunahme der Verwendung dieser Technik. Mit Hilfe von XAS können wegen der hohen Intensitäten der Synchrotronstrahlung viele chemische Elemente in der Fest-, Flüssig- und Gasphase auch in sehr kleinen Konzentrationen untersucht werden. Mit den geplanten neuen Synchrotronquellen der dritten Generation wird es daher möglich sein, die Erfassungsgrenze noch weiter zu senken. Die XAS ist eine elementspezifische Methode, die Aussagen über die Oxidationsstufe, die Bindungsverhältnisse und die nächsten Nachbarn eines adsorbierten Atoms gibt.

Für die Aufgabenstellungen des Institutes ist der Einsatz beider Varianten der XAS, X-ray Absorption Near Edge Structure Spectroscopy (XANES) und Extended X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy (EXAFS), notwendig.

Das Gebiet der Aktiniden- und Radionuklidforschung mit XAS erscheint nahezu unerschlossen zu sein. Im Institut für Radiochemie sind folgende Forschungsprojekte mit XAS geplant:

- Speziation und Komplexierung der Aktiniden in umweltrelevanten Lösungen,
- Aufklärung des Adsorptionsverhaltens von Aktiniden an Mineralien und Feststoffen (mit einem Schwerpunkt auf der Erforschung des Urans an Mineralien, die in der Umgebung der WISMUT zu finden sind),
- Aufklärung der Adsorptionsmechanismen und eventueller Oxidations-

stufenveränderungen der Aktiniden an biologischen Materialien (hier ist eine intensive Zusammenarbeit mit dem Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie geplant).

Der Einsatz von Lanthanidenelementen als Modellverbindungen für bestimmte Aktinidenelemente ist ebenfalls geplant.

Für diese Untersuchungen eignen sich die L-Röntgenabsorptionskanten, die im Energiebereich zwischen 16,3 keV und 23,1 keV liegen. Die L<sub>III</sub>-Kanten, mit Energien um etwa 17 keV, bieten sich wegen ihrer guten Ausbeute besonders an.

## 2. Abschätzung des Strahlzeitbedarfes

### *Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung*

Das Institut wird einen speziellen Meßplatz für in-situ-Experimente zur ionenstrahlgestützten Schichtabscheidung aufbauen. Daneben werden Standardmeßplätze für Oberflächendiffraktion, Kleinwinkelstreuung, Fluoreszenz-EXAFS und Totalreflexionsmessungen (alle mit streifendem Strahleinfall) genutzt werden. Der geschätzte Meßzeitbedarf beträgt für die ersten beiden 10 Wochen/Jahr und für die letzteren 4 Wochen/Jahr.

### *Institut für Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie*

Röntgenstrukturanalyse                      4 Wochen / Jahr

EXAFS / XANES                                4 Wochen / Jahr

### *Institut für Radiochemie*

Das Institut wird 2 eigene Meßplätze aufbauen, die auch für die Untersuchung radioaktiver Proben (inclusive Aktiniden) mit EXAFS und XANES geeignet sind. Zum einen wird es ein konventioneller XAS-Meßplatz sein und zum anderen ein Platz mit Mikrofokus für das Studium der orts aufgelösten Elementverteilung in Proben.

## 3. Spezifische Anforderungen

Energiebereich bis 25 keV mit hoher Brillanz (Tracernachweis)  
Brillanz >  $10^{15}$  phot / mm<sup>2</sup> mrad<sup>2</sup> sec 0,1%BW (Nachweisempfindlichkeit,  
in-situ-Experimente)

Lebensdauer  $\geq$  8 h

Möglichkeiten für Aufbau unkonventioneller Probenumgebungen (Ionenstrahlkammern, glove-box für radioaktive Proben)

## 9. Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Einrichtungen können wegen ihrer stark auftragsgebundenen Forschungsthemen nur bedingt Prognosen für einen mittelfristigen Zeitraum stellen. Dementsprechend sind nur Problemkreise angegeben, bei denen sich Aufgaben für Experimente mit Synchrotronstrahlung ergeben könnten.

### 9.1. Fraunhofer-Einrichtung für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe, Dresden

---

Als inhaltliche Schwerpunkte für künftige Arbeiten an einer solchen Strahlenquelle werden gesehen:

- Analyse von Minoritätsphasen, insbesondere teilkristalline Korngrenzenphasen (z. B. komplexe Übergangsmetallsilikate u. ä.)
- Kristallinitäts- und Kristallitgrößmessungen beim Übergang amorph --> kristallin von Korngrenzenphasen (einschließlich der Messung bei Temperaturen bis 1700 °C)
- Mikroporosität > 1% an gesinterten Keramiken
- Beurteilung der Homogenität der Kristallisation der Korngrenzenphase durch Röntgendiffraktometrie in kleinen Volumina
- Untersuchung von dünnen Schichten auf Keramiksubstraten

Eine Abschätzung des Strahlzeitbedarfs erscheint uns derzeit nicht möglich, da wir solche Arbeiten in entsprechende Projekte einbinden müßten, was nur verhältnismäßig kurzfristig erfolgen kann.

Aufgrund der derzeitigen Aufgabenstellungen und Projektinhalte sind gegenwärtig keine eigenen Meßapparaturen absehbar.

Wir halten jedoch den Aufbau einer solchen Strahlungsquelle im Rahmen des Dresdner Materialforschungsverbundes auch für die angewandte Forschung sehr vorteilhaft, da sich dadurch neue Möglichkeiten zur intensiveren Bearbeitung neuer Aufgaben bei keramischen Hochleistungswerkstoffen ergeben sollten.

### 9.2. Fraunhofer-Einrichtung für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik, Dresden

---

Das Institut beschäftigt sich mit der Verfahrensentwicklung zur Abscheidung dünner und dicker Schichten sowie der Oberflächenmodifikation von Werkstoffen mittels Elektronenstrahl- und Plasmatechnik. Der Dickenbereich der abgeschiedenen Schichten reicht von ca. 100 nm bis zu einigen µm. Bei der Oberflächenmodifikation erstrecken sich die Veredlungstiefen von einigen 0,1 mm bis zu einigen mm. Bei den Schichtmaterialien werden schwerpunktmäßig auch amorphe Werkstoffe abgeschieden. Bei Schichten mit kristallinem Aufbau interessieren:

- qualitative und quantitative Phasenanalyse
- Texturanalyse
- Teilchengrößenbestimmung
- Präzisionsgitterkonstanten-Bestimmung
- Messung von Eigenspannungen
- Versetzungsdichtebestimmung

Man geht davon aus, daß insbesondere bei den dicken Schichten Gefüge- bzw. Strukturgradienten auftreten, die ebenfalls in die Betrachtung einbezogen werden müßten.

## C) Forschungseinrichtungen Tschechiens und der Slowakei

Der Vorsitzende der tschechoslowakischen Synchrotronstrahlungsgesellschaft, Herr Dr. J. Hrdy (Prag), war so freundlich seine Fachkollegen zu bitten, auf die Fragen zur Nutzung einer künftigen Synchrotronstrahlungsquelle in Dresden/Rossendorf zu antworten. Die Antworten sind nur stichwortartig, so daß sie nachfolgend in deutscher Übersetzung wiedergegeben werden. Im Gegensatz zu vorherigen Darstellungen sind hier Namen angegeben, um die Interessenten besser identifizieren zu können, da strukturelle Veränderungen in den Forschungseinrichtungen erwartet werden.

### Karls-Universität Prag

Fakultät für Mathematik und Physik, Röntgen-Labor  
(Doz. V. Valvoda)

1. Pulverdiffraktometrie mit Synchrotronstrahlung
2. Studium der Struktur polykristalliner Filme  
Meßzeitbedarf ca. 150 h / Jahr
3. Wellenlängenbereich: 0,1-0,2 nm
4. Teilnahme an einem Projekt für ein Pulverdiffraktometer

### Hochschule für Chemische Technologie, Prag

Zentrallaboratorium

(J. Maixner)

1. Interesse besteht hinsichtlich des Einsatzes der Synchrotronstrahlung für die Strukturaufklärung von Proteinen sowie die Bestimmung der absoluten Konfiguration von organischen und organometallischen Verbindungen aus Einkristalldaten. Weiteres Interesse besteht im Studium von Phasenübergängen bei anorganischen Pulverproben.
2. Es werden die Messung und Lösung von mehr als 20 Strukturen und ca. 100 Pulverdiffraktogrammen im Jahr als Bedarf abgeschätzt.
3. keine speziellen Anforderungen
4. Die Installation eines eigenen Instrumentes ist gegenwärtig nicht vorgesehen.

### Institut für Physik der Akademie der Wissenschaften, Prag

Abteilung Struktur und Bindung

(Z. Šourek)

1. Hochauflösende Röntgen-Bragg-Diffraktometrie  
Röntgentopographie
2. Experimentelle Untersuchung der strukturellen Eigenschaften von Einzel- und Vielschichten, die mit verschiedenen Verfahren (LPE, MBE, MOCVD, Ionenimplantation, Diffusion u.a.) auf realen Einkristallen erzeugt

werden.

Röntgentopographie mit weißem Strahl und Doppelkristallanordnung an Substratmaterial (Si, AlIIBV, Granate u.a.)

3. harte Röntgenstrahlung ( $\lambda$  ca. 1 Å); Topographiekamera für weißen Strahl; später Diffraktometer
4. gegenwärtig nicht vorgesehen

Laboratorium für mikrostrukturelle Methoden

(J. Cermak, M. Cernanský)

1. Pulverdiffraktometrie und Pulverkameras
2. 10 h / Jahr
3. übliche Forderungen für Pulvermethoden

Laboratorium für Röntgenspektroskopie

(M. Polcik)

1. Es ist vorgesehen, Röntgen-Emissions-Bänder (z.B. Übergänge von Core-Loch-Zuständen in Valenz-Zustände) im mittleren Wellenlängenbereich (0,09-0,2 nm) nach Anregung mit Synchrotronstrahlung zu messen.
2. Die Methode ist kompatibel zur Photo-Emissions-Spektroskopie, so daß ein breites Spektrum von Verbindungen gemessen werden kann.
3. Monochromatische Primärstrahlung
4. Es wurde bereits ein kompaktes Zwei-Kristall-Spektrometer im eigenen Laboratorium gebaut und getestet, das an einem Speicherring installiert werden soll.

Laboratorium für mikrostrukturelle Methoden

(M. Polcarova, J. Bradler)

1. Dreikristallexperimente an epitaktischen Schichten, Vielfachschichten und Oberflächenschädigungen
2. ca. 2 Wochen / Jahr  
Wellenlängenbereich: 0,04 - 0,2 nm
3. sehr gute räumliche Stabilität der Quellpunktposition
4. personelles Engagement möglich; eigenes Instrument nicht vorgesehen

Gruppe für Röntgenoptik

(M. Kopecký, E. Krouský, O. Renner)

1. Röntgenreflektometrie an Dünnschichten, Schichtsystemen, Oberflächen  
absolute Kalibrierung von Röntgendetektoren
2. pro Jahr 1 Monat; vorwiegend weicher Röntgenbereich
3. Energiebereich: 0,5 - 10 keV

Laboratorium für nichtkristalline Strukturen

(L. Cervinka)

Interesse an EXAFS-Experimenten und Diffraction unter Ausnutzung der anomalen Streuung

## Institut für Makromolekulare Chemie der Akademie der Wissenschaften, Prag

Gruppe Diffraktionsanalyse von Molekularstrukturen  
(K. Huml)

1. Synchrotronstrahlung soll zu Strukturuntersuchungen an Einkristallen eingesetzt werden. Wellenlängenbereich: 0,01-1 nm Materialien: Proteine, Nukleinsäuren, andere komplizierte Strukturen
2. keine Abschätzung
3. Vierkreisdiffraktometer für Einkristallstrukturuntersuchungen

siehe auch Universität für Chemische Technologie

## Institut für Radiotechnik und Elektronik der Akademie der Wissenschaften, Prag

Röntgen- und Elektronenmikroskopielabor  
(P. Kacerovský)

2. Messung von Zwei- und Dreikristall-Rockingkurvenprofilen bei verschiedenen Temperaturen von 4,2 K bis 373 K.  
extrem asymmetrische Bragg-Diffraktion  
Mikrodiffraktion und Topographie
3. Gefordert wird eine durchstimmbare Wellenlänge von 0,25-0,5 nm und eine Quellpunktgröße unter  $1\mu\text{m}^2$
4. Eigene Beiträge können bei der Herstellung von Monochromatoren, geheizten Probenhaltern sowie Konstruktion von Kryostaten und Goniometern erbracht werden.

## Universität für Chemische Technologie, Pardubice

(M. Steinhart)

in Kooperation mit Institut für Makromolekulare Chemie der Akademie der Wissenschaften, Prag (J. Pleštil, J. Baldrian)

1. Das Hauptinteresse besteht an zeitaufgelösten Messungen der Klein- (SAXS) und Weitwinkelstreuung (WAXS) an biologischen und polymeren Materialien (reine Polymere, Mischungen, Lösungen, Gele, Polyelektrolyte, Mizellen) während der Kristallisation, Entmischung, spinoidalen Entmischung, Phasentransformation, Umorientierung und des Schmelzens.
2. viermal pro Jahr 2-3 Experimenttage
3. SAXS erfordert vor allem ausreichende Intensität im Wellenlängengebiet 0,15-0,2 nm und Strahllebensdauern von 10h. Die gewählte Energie von 3 GeV ist ideal.  
Von experimenteller Seite werden ein guter Monochromator (Doppelkristall - Si(111)), lineare und zweidimensionale ortsauflösende Detektoren und die

- Möglichkeit der simultanen Messung von SAXS und WAXS gewünscht.
4. Teilnahme am Entwurf einer Kleinwinkelstreuapparatur, insbesondere der Komponenten Kamera, Probenwechsler, Temperatursprung-Einrichtung und deren Steuerung (hard- und software) sowie Datenerfassungs- und Datenauswertungssoftware.

#### Zentrales Forschungsinstitut ŠKODA, Plzen (J. Fiala)

1. Spezifisches Interesse besteht an der Röntgendiffraktion zum Zwecke der Phasenanalyse von Minoritätsphasen sowie einer simultanen Phasen- und Realstrukturanalyse (Faktoranalyse)
2. Meßzeitbedarf: einige Stunden / Jahr
3. Die Forderungen an die Quelle entsprechen den Standardwerten für Röntgendiffraktion. Die Nutzungsmöglichkeit eines vorhandenen Röntgendiffraktometers wird vorausgesetzt.
4. Wahrscheinlich kein Beitrag in Form eines eigenen Instrumentes.

#### Institut für Physik der Slowakischen Akademie der Wissenschaften, Bratislava (M. Jergel)

1. anomale inelastische und magnetische Streuung an Multischichtstrukturen vom Metall/Metall- und Metall/Metalloidytyp
2. Strahlzeit: 14 Tage pro Jahr
3. Energiebereich: 5 -20 keV  
benötigt wird ein asymmetrischer Wiggler für zirkular polarisierte Strahlung

### D) Forschungsaktivitäten in Polen

Eine direkte Umfrage in verschiedenen Forschungslaboratorien Polens konnte nicht durchgeführt werden. Herr Prof. A. Kisiel (Jagellonen-Universität Krakow), Vorsitzender der Polnischen Synchrotronstrahlungsgesellschaft, war jedoch so freundlich einen Überblick über die Forschungsaktivitäten polnischer Gruppen zu geben, aus denen sich Kooperationsperspektiven an einem Speicherring ROSY ergeben würden. Die Darstellung wird in deutscher Übersetzung leicht gekürzt wiedergegeben.



"Während der letzten Dekade kooperierten viele polnische Wissenschaftler aktiv mit Synchrotronstrahlungszentren weltweit. Die Wissenschaftler aus verschiedenen Universitäten sowie aus Instituten der Polnischen Akademie der Wissenschaften repräsentieren aktuelle Arbeitsgebiete der Festkörperphysik, der Chemie und der Biologie. Die Hauptinteressenfelder sind:

1. Diffraktionsuntersuchungen (Einkristalle, speziell Mikrokristalle, und polykristalline Materialien) mit folgenden Themen.

- zeitaufgelöste Röntgendiffraktionsuntersuchungen von Phasenübergängen
- Reaktionskinetik in kontrollierter Umgebung
- absolute Strukturbestimmung unter Nutzung der Durchstimbarkeit der Synchrotronstrahlung (kleine und mittelgroße Moleküle, die nur leichte Atome enthalten)
- Nutzung der Resonanzstreuung für die Strukturbestimmung bei Makromolekülen
- Ein- und Multikristall-Röntgentopographie, Oberflächendiffraktion, Methode der stehenden Wellen für die Untersuchung der Realstruktur von Werkstoffen
- diffuse Streuung und Reflektometrie

2. Röntgenabsorptionsspektroskopie und Röntgenemissionsspektroskopie zur Analyse der Elektronenstruktur von Metallen, Halbleitern, organischen Verbindungen und Makromolekülen (XANES). Lokale Strukturanalyse von metallischen Legierungen, binären und ternären Halbleiterverbindungen, sowie stöchiometrischen und nichtstöchiometrischen anorganischen und organischen Verbindungen mittels EXAFS-Spektroskopie.

3. VUV-Spektroskopie und Photoemissionsuntersuchungen an Metallen und Halbleitern.

4. Atom- und Molekularspektroskopie zum Studium von Photoionisationseffekten, freien Elektronen-Lasern usw..

5. Angewandte biologische und medizinische Studien mit EXAFS und XANES. Untersuchungen der Transferprozesse intermediärer Phasen in organischen biologischen Systemen einschließlich Mineralkomponenten. Resonanzanalyse von Spurenelementen im Gewebe.

6. Industrielle Anwendungen im Bereich der Röntgenlithographie, der Röntgenmikroskopie u.a.

Bis zum Jahre 1992 publizierten polnische Wissenschaftler gemeinsam mit ihren Kooperationspartnern im Ausland mehr als 160 Arbeiten über die Anwendung der Synchrotronstrahlung in Physik, Chemie Biologie und Medizin in internationalen Zeitschriften. Für die Entwicklung der Forschung in Polen unter Nutzung der Synchrotronstrahlung wurde 1991 die Polnische Synchrotronstrahlungs-Gesellschaft gegründet. Ihr ambitioniertes Programm zielt auf die Vereinigung der Einzelwissenschaftler und Forschungsgruppen, die über eine

große Anzahl wissenschaftlicher Institutionen in Polen verteilt sind. Ein Element dieser Bemühungen war die Organisation einer Internationalen Schule und Symposiums über Synchrotronstrahlung in den Naturwissenschaften, an der etwa 50 Mitglieder der Gesellschaft und 20 Lektoren aus dem Ausland teilnahmen. Die Berichte der Internationalen Schule wurden in Acta Physica Polonica publiziert (vol. 82, No. 1&2, 1992).

Im Jahre 1992 waren polnische Wissenschaftler mit folgenden Forschungsthemen befaßt:

### I. Röntgendiffraktion und Röntgenstreuung

1. Anomale Streuung von Synchrotronstrahlung an leichten Atomen (J. Grochowski; Jagellonen-Universität)
2. Abbildung von Versetzungen im Diamant mit Synchrotronstrahlungstopographie im Bragg-Fall (W. Wierzchowski; Universität Warschau)
3. Hochauflösende Kristallstrukturuntersuchungen mit Synchrotronstrahlungs- und Neutronendiffraktion (I. Sosnowska; Universität Warschau)
4. Hochdruck-Einkristall-Diffraktometrie (A. Waskowska; Institut für Tieftemperatur- und Strukturforchung PAN, Wroclaw)
5. Niedrigdimensionale Strukturen in Übergangsmetallchalcogeniden (A. Butkowski, Jagellonen-Universität)
6. Leitfähige Polymere - Strukturuntersuchungen mit Synchrotronstrahlungsdiffraktion (S. Niziol, W. Luzny, P. Barta ; Bergakademie Krakow)

### II. Röntgenabsorptionspektroskopie

#### A. EXAFS-Untersuchungen

7. Lokale Struktur von ternären metallischen Legierungen (K. Lawniczak-Jablonska; Physikalisches Institut PAN Warschau)
8. Lokale Struktur von quaternären Halbleiterverbindungen mit Übergangsmetallen / CdMnTeSe und CdFeTeSe (A. Kisiel, J. Konior, J. Lazewski und M. Starnawska; Jagellonen-Universität Krakow)
9. Lokale Struktur von ternären Sulfiden mit Magnesium (A. Kisiel, M. Starnawska; Jagellonen-Universität Krakow)
10. Untersuchung von Verbindungen des Typs  $RMn_2H_x$  mit EXAFS und magnetischem Dichroismus mittels Röntgenstrahlen (R = Y, seltene Erden) (C. Kapusta, J. Przewoznik; Bergakademie Krakow)
11. Studium des zirkularen magnetischen Röntgen-Dichroismus von stabilen Karbiden, Nitriden und Hydriden (C. Kapusta, H. Figiel, G. Stoch und A. Lemanski; Bergakademie Krakow)
12. Strontium als Indikator intermediärer Phasen bei der Knochenmineralisation (E. Rokita, T. Cichocki, L. Jarczyk, A. Strzalkowski, A. Wrobel; Jagellonen-Universität Krakow)
13. Spurenelementanalyse mit Synchrotronstrahlung (W. Kwiatek, E. Marczewska, E. Dutkiewicz; Institut für Kernphysik, Krakow / J. Paluskiewicz; Jagellonen-Universität Krakow / M. Galka; Medizinische Akademie, Krakow)

#### B. XANES-Untersuchungen

14. Experimentelle und theoretische Studien der Leitungsbandstruktur von

binären und ternären Verbindungen  $A^{II}MeB^{VI}$  mit  $A^{II} = Hg, Cd, Zn$ ;  $Me = \text{Übergangsmetall}$ ;  $B^{VI} = Te, Se, S$  (A. Kisiel, R. Markowski; Jagellonen-Universität)

15. Emissionsspektroskopie weicher Röntgenstrahlung an  $ZnMeSe$  (A. Kisiel; Jagellonen-Universität Krakow)
16. Elektronenstruktur von Hochtemperatursupraleitern untersucht mit Synchrotronstrahlungs-XANES und Photoemissionsmethoden (A. Kolodziejczyk, J. Chmist, Z. Tarnawski, Z. Kakol, A. Kozlowski, W. Woch; Bergakademie Krakow)
- C. Oberflächen-EXAFS-Untersuchungen
17. Analyse von oberflächenimplantierten As-Ionen (J. Auleythner; Physikalisches Institut PAN, Warschau)

### III. Photoemissionsspektroskopie

18. Photoemissionsuntersuchungen an  $ZnMeSe$  ( $Me = Mn, Fe$  und  $Co$ ) Mischverbindungen (D. Debowska, A. Kisiel; Jagellonen-Universität)
19. Photoemissionsuntersuchungen an Halbleiterverbindungen (B. Orłowski, J. Kowalski)

### IV. Atom- und Molekülspektroskopie

20. Mehrfachionisationsanalyse von Molekülen mit Koinzidenztechnik (M. Stankiewicz, T. Dohnalik; Jagellonen-Universität Krakow)

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß sich die Forschungen polnischer Wissenschaftler mit Synchrotronstrahlung im Jahre 1992 auf folgende Gebiete konzentrierten:

1. Diffraktionsuntersuchungen
2. Röntgentopographie
3. Röntgenabsorptionsspektroskopie (EXAFS, XANES, SEXAFS) für die Analyse der kristallinen und elektronischen Struktur von anorganischen, organischen und biologischen Systemen
4. Resonanz- und winkelaufgelöste Photoemissionsspektroskopie zur Analyse des Valenzbandes
5. VUV-Spektroskopie für die Analyse der elektronischen Struktur von anorganischen und organischen Verbindungen
6. Atom- und Molekularspektroskopie zum Studium hochionisierter Atome und Moleküle

Die bedeutenden Forschungsaktivitäten mit Synchrotronstrahlung polnischer Gruppen in Zusammenarbeit mit Forschungsgruppen verschiedener Länder sind ein Nachweis dafür, daß erstere über hinreichende Erfahrung zur aktiven Teilnahme an anspruchsvollen Untersuchungen unter Anwendung der Synchrotronstrahlung verfügen. In dieser Situation werden durch die zukünftige Nutzung des projektierten Speicherringes ROSY neue Möglichkeiten, auch für eine enge wissenschaftliche Kooperation zwischen polnischen und sächsischen Instituten, eröffnet."

## Technische Standortbeschreibung für Rossendorf

### 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 die vorhandene Kapazität übersteigen, kann aber durch den Anschluß an die in ca. 4 km Entfernung südlich des Institutsgeländes vorbeiführende 380 kV Hochspannungsleitung gesichert werden. Das Energieversorgungsunternehmen plant für die nächsten Jahre, unabhängig von den Ausbauplänen, eine Umstellung der Endverteiler bei den Abnehmern. Im Rahmen dieser Aktion kann der zusätzliche Anschlußbedarf installiert 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 waren 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

## Rosendorfer Synchrotronstrahlungsquelle

Projektvorschlag 2. Fassung  
Stand November 1993

Teil II: Maschinenkonzept und Technisches Projekt

## **Inhaltsverzeichnis**

1	Allgemeines	II-1
2	Magnetstruktur	II-4
2.1	Allgemeine Grundlagen	II-4
2.2	Achromat des Speicherringes ROSY	II-8
2.2.1	Einheitszelle des Achromaten	II-8
2.2.2	Aufbau des Achromaten	II-15
2.2.3	Magnetoptisches Verhalten des Achromaten	II-17
2.3	Untersuchungen zum Arbeitspunkt	II-21
2.4	Dynamische Apertur des Speicherringes ROSY	II-24
2.4.1	Wahl der Sextupolanordnung	II-24
2.4.2	Dynamische Apertur unter Berücksichtigung der Multipolfehler	II-32
2.5	Flexibilität der Magnetoptik des Speicherringes ROSY	II-37
2.6	Aufstellgenauigkeit der Magnete und Position der Korrektorelemente	II-42
2.7	Aufbau des Speicherringes	II-52
2.8	Ausbau von ROSY mit supraleitenden Magneten	II-57
3	Berechnung der Strahllebensdauer	II-62
3.1	Einleitung	II-62
3.2	Begrenzungen durch die Mikrowelleninstabilität	II-62
3.3	Effekte durch Streuung innerhalb des Strahls	II-63
3.4	Die Lebensdauer des Elektronenstrahl	II-64
4	Einfluß von Wigglern und Undulatoren auf die Strahlparameter des Speicherringes ROSY	II-67
4.1	Arbeitspunktverschiebung beim Einbau von Wigglern und Undulatoren	II-67
4.2	Einfluß der Wiggler auf die Emittanz des Speicherringes	II-70
5	Injektion	II-74
5.1	Injektionsprozeß	II-74
5.2	Aufbau der Kicker	II-78
5.3	Aufbau des Septums	II-81
6	Magnete	II-83
6.1	Allgemeines	II-83
6.2	Ablenkmagnete	II-84
6.3	Quadrupole	II-98

6.4	Sextupole	II-106
6.5	Korrekturmagnete	II-109
6.6	Zusammenfassung	II-114
7	Hochfrequenzsystem	II-117
7.1	Anforderungen an das HF-System	II-117
7.2	Leistungsbilanz des HF-Systems	II-118
7.3	Überspannungsfaktor q und Energieakzeptanz des HF-Systems	II-119
7.4	Instabilitäten	II-120
7.5	Auswahl geeigneter Cavities	II-122
7.6	Diskussion	II-123
7.6.1	Beschleunigungssystem mit einzelligen Cavities	II-123
7.6.2	Beschleunigungssystem mit mehrzelligen Cavities	II-124
7.6.3	Zusammenfassung	II-125
7.7	Schaltungsbeschreibung	II-126
7.7.1	Leistungsteil	II-126
7.7.2	Steuerteil	II-126
8	Netzgeräte und Energieversorgung	II-131
8.1	Netzgeräte (Power Supplies) - Prinzipien und Wirkungsweise	II-131
8.1.1	Allgemeine Anforderungen	II-131
8.1.2	Stromregelung mit Thyristorstellgliedern	II-132
8.1.3	Stromregelung durch Pulsweitenmodulation (PWM)	II-133
8.1.4	Stromregelung durch PWM ohne Netztransformator	II-136
8.1.5	Auswahl der geeigneten Verfahren für ROSY	II-136
8.2	Anschluß der Magnete an die Netzgeräte	II-137
8.3	Spannungsversorgung für HF-System	II-139
8.4	Anschluß an das Kontroll- und Überwachungssystem	II-141
8.5	Energieversorgung der gesamten Anlage ROSY	II-142
8.5.1	Allgemeine Betrachtungen	II-142
8.5.2	Energiebedarf	II-143
8.6	Abführung der Verlustleistung	II-147
9	Vakuumsystem ROSY	II-148
9.1	Vorbemerkungen	II-148
9.2	Vakuorkammern	II-150
9.3	Vakuumpumpen	II-157
9.4	Belüftungseinrichtungen	II-162
9.5	Ventile	II-162
9.6	Vakuum-Diagnostik	II-163
9.7	Temperiereinrichtungen	II-163
9.8	Ringeinbauten	II-164
9.9	Strahldiagnostik	II-164



10	Der Injektor	II-165
10.1	Der Vorinjektor	II-165
10.2	Das Booster-Synchrotron	II-167
10.2.1	Übersicht	II-167
10.2.2	Vergleich von DBA- und FODO-Struktur	II-167
10.3	Transferweg	II-177
11	Strahldiagnose und Instrumentierung	II-183
11.1	Einleitung	II-183
11.2	Beam-Position-Monitore (BMP)	II-184
11.3	Folienmonitore	II-185
11.4	Strommonitore	II-185
11.5	Diagnosebeamline	II-186
11.6	Lebensdauer- und Tunemessung	II-186
11.7	Allgemeine Instrumentierung	II-187
12	Kontrollsystem	II-188
12.1	Einführende Bemerkungen	II-188
12.2	Leitlinien für Entwurf und Implementierung	II-188
12.3	Architektur des ROSY-Kontrollsystems	II-189
12.4	Erwartete Datenmengen, Parameteraufkommen und Bandbreite im Kontrollsystem	II-191
12.5	Vorgesehene Netzwerk-Topologie	II-192
12.5.1	Geographische Randbedingungen	II-192
12.5.2	Ethernet-Realisierung	II-193
12.6	Kommunikationsmechanismen im Kontrollsystem	II-194
12.6.1	Synchrone und asynchrone Kommunikationsmechanismen	II-195
12.6.2	Horizontale und vertikale Kommunikationsrichtungen	II-195
12.7	Beschreibung der Software-Struktur	II-196
12.7.1	Die Resource-Datenbank	II-196
12.7.2	Verwaltung von Objektnamen und Parameterklassifizierung	II-197
12.7.3	Die verteilte Online-Datenbank	II-198
12.7.4	Regelmaschinen	II-199
12.7.5	Backbone-Datenbanken	II-200
12.7.6	Applikations-Interface	II-201
12.7.7	Wahl des Betriebssystems der Prozeßebene	II-201
12.7.8	Prozeßgerüst und Taskmenge im Prozeßsystem	II-203
12.7.9	Prozeß-Datenbank und Kanaladressierung	II-204
12.7.10	I/O-Manager und I/O-Tasks	II-204
12.8	High-Level-Applikationen	II-205
12.8.1	Das grafische Man-Machine-Interface	II-205
12.8.2	Trendmanager	II-209
12.8.3	Alarmmanager	II-209
12.8.4	Datenlogger	II-210

12.8.5	Simulationsprogramme	II-210
12.8.6	Interaktive Strahlagekorrektur	II-211
12.8.7	Strahldiagnose und Untersuchungen zur Strahldynamik	II-211
12.8.8	Automatisierung von Meß- und Steuersequenzen	II-212
12.9	Strahldiagnose, Feedbacksysteme und Regelungen	II-212
12.9.1	Minimalbestandteile der Strahldiagnose im Kontrollsystem	II-212
12.9.2	Feedbacksysteme zur Behandlung von Instabilitäten	II-213
12.9.3	Schnelle Strahlagekorrektur	II-213
12.10	Timing- und Triggersystem	II-214

13	Gebäude	II-215
13.1	Experimentierhalle und Speicherring	II-215
13.2	Maschinenversorgung und Haustechnik	II-216
13.3	Mehrzweckgebäude	II-216
13.4	Standortwahl	II-217

Referenzen	II-229
------------	--------

Anhang II.A:	Eingabedaten und Lösungen für die Optiken ROSY A, ROSY B und ROSY C
Anhang II.B:	Eingabedaten für die Optiken ROSY A, ROSY B und ROSY C für das Programm RACETRACK
Anhang II.C:	Eingabedaten der Optik ROSY A, inklusive der Multipolfehler bis $n=10$ , für das Programm BETA und Ergebnis der dynamischen Apertur
Anhang II.D:	Eingabedaten der Optik mit supraleitenden Magneten für das Programm RACETRACK

Mitarbeiter und Danksagungen

## 1 Allgemeines

Speicherringe als dedizierte Synchrotronstrahlungsquellen werden seit mehr als 20 Jahren gebaut. Stellvertretend für viele sollen hier nur BESSY I [BE 79] und die NSLS [St 80] genannt werden. Diese Speicherringe werden auch als Synchrotronstrahlungsquellen der 2. Generation bezeichnet, da sie ausschließlich zum Zwecke der Erzeugung von Synchrotronstrahlung gebaut wurden. Mit der Entwicklung der Undulatoren und Wiggler [Mo 53] und den höheren Ansprüchen der Nutzer, die eine hohe Brillanz mit Strahlquerschnitten von  $\sigma \sim 100 \mu\text{m}$  verlangten, wurden die Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation gebaut. Stellvertretend sollen hier die Projekte ESRF [ES 87], ALS [AL 86], ELETTRA [EL 89] und BESSY II [BE 93] genannt werden. Diese Quellen zeichnen sich dadurch aus, daß die natürliche Emittanz kleiner als  $10 \pi \text{ nm rad}$  ist und 20 - 30 % des Umfanges für den Einbau von Wigglern und Undulatoren bereitgestellt werden.

Mit der ESRF existiert eine multinationale Quelle der 3. Generation im Energiebereich von 6 GeV. Mit ELETTRA (ab 1994), MAX II (ab 1995) und BESSY II (ab 1997), stehen mehrere nationale Synchrotron-Strahlungsquellen der 3. Generation im Energiebereich zwischen  $1,5 \leq E \leq 2,1 \text{ GeV}$  zur Verfügung. Nicht abgedeckt mit Quellen der 3. Generation ist der Energiebereich um 3 GeV. Mit dem Projekt ROSY soll diese Lücke geschlossen werden.

Für die Synchrotronstrahlungsquelle ROSY liegt eine erste Studie vor [Ro 92]. Diese genügt den Anforderungen an eine Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation nur hinsichtlich der Emittanz. Der in [Ro 92] dargestellte Entwurf, mußte, um den Ansprüchen einer Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation zu genügen, in dem Sinne überarbeitet werden, daß 20 - 30 % des Umfanges für den Einbau von Insertion Devices bereitgestellt werden können. Mit der hier vorliegenden Studie wird dies erreicht. Erste Ergebnisse dieses Entwurfes wurden auf dem ersten Nutzertreffen für ROSY [NU 92] und auf den Konferenzen PAC 93 [Ei 93a] und ECCART 93 [Ei 93b] vorgestellt.

Neben ROSY gibt es in Europa drei weitere Synchrotronstrahlungsprojekte, die sich in der Entwurfsphase befinden und für die eine Design - Studie vorliegt: Swiss Light Source (SLS) [SL 93], SOLEIL in Orsay bei Paris [SO 92] und DIAMOND in Daresbury, Großbritannien [DI 93]. SLS und SOLEIL haben eine Energie von 2,1 GeV und DIAMOND von 3 GeV ( wie ROSY ). Bemerkenswert ist, daß sich alle 4 Projekte hinsichtlich der Konzeption unterscheiden.

Die Qualität einer Synchrotronstrahlungsquelle läßt sich durch folgende Größen angeben:

1.  $\varepsilon$  (nor), d.h. die auf eine Energie von 1 GeV normierte Emittanz.

2.  $L(\text{ID}) / \text{Umfang}$ , d.h. die Ausnutzung des Umfanges für den Einbau von Insertion Devices.  $L(\text{ID})$  ist dabei die Gesamtlänge aller Insertion Devices.

3.  $\epsilon(\text{nor}) * N^3$ , d.h. die normierte Emittanz multipliziert mit der 3. Potenz der Anzahl  $N$  aller Ablenkmagnete.

Der Punkt 1 ist eine Angabe über die zu erreichende Brillianz ( sollte möglichst klein sein ), Punkt 2 über die Ausnutzung des Umfanges zur Erzeugung von hohen Brillianzen ( sollte möglichst groß sein ) und Punkt 3 über die Kompaktheit der Maschine ( sollte möglichst klein sein ). In der Tabelle 1.1 sind diese Größen, der sich in Europa in der Projektphase befindlichen Anlagen, zusammengestellt.

Tab. 2.1: Vergleich der sich in Europa in der Projektphase befindlichen Projekte

Projekt	Energie [GeV]	Umfang [m]	$\epsilon$ [nm rad]	$\epsilon(\text{nor})$ [nm rad GeV <sup>2</sup> ]	$\epsilon(\text{nor})N^3$ [nm rad GeV <sup>2</sup> ]	$L(\text{ID})/\text{Umf}$
SLS	2,1	240	3,2	0,726	$5,31 \cdot 10^4$	27 %
SOLEIL	2,1	200	37	8,0	$3,28 \cdot 10^4$	39 %
DIAMOND	3,0	300	30	36,0	$36,0 \cdot 10^4$	16 %
ROSY	3,0	148	28	2,31	$2,31 \cdot 10^4$	22 %

Entsprechend Tabelle 2.1 sind die Optimierungsschritte für die verschiedenen Projekte zu erkennen:

- \* SLS wurde auf eine möglichst kleine Emittanz und auf möglichst lange geraden Strecken optimiert.
- \* SOLEIL wurde entworfen unter dem Aspekt einer optimalen Ausnutzung des Umfanges für den Einbau von Insertion Devices
- \* DIAMOND wurde ebenfalls bezüglich einer kleinen Emittanz optimiert
- \* ROSY wurde mit der Maßgabe optimiert, eine minimale Emittanz mit einer kompakten Bauweise zu erreichen.

Alle Projekte unterscheiden sich auch in ihrer Magnetoptik (Lattice). SLS hat eine MBA-, SOLEIL eine DBA-, DIAMOND eine TBA- und ROSY eine MBA-Struktur. Zwei von diesen Projekten, SLS und DIAMOND, wollen supraleitende Magnete verwenden. Auch der Design von ROSY erlaubt den Einbau supraleitender Magnete. Zwei Projekte, SOLEIL und ROSY, geben die

Bedingung auf, daß die Dispersionsfunktion ( $\eta(x)$ ) am Orte der Wiggler und Undulatoren null sein muß. Im Gegensatz zu den anderen Projekten werden bei ROSY fokussierende Ablenkmagnete benutzt, die eine kompakte Bauweise unter Beibehaltung einer kleinen Emittanz erlauben. Die Verwendung von "combined function" Ablenkmagneten aufgrund der Erfahrungen bei den Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation ALS [Ja 93] und ELETTRA [Wr 93] sollten keine Probleme mit sich bringen.

## 2 Magnetstruktur

### 2.1 Allgemeine Grundlagen

In der vorhergehenden Studie [Ro 92] für die Synchrotronstrahlungsquelle ROSY und in weiteren Arbeiten [Ei 92a], [Ei 92b], [Ei 92c], [Ei 93a] und [Ei 93b] wurde die Optimierung eines Speicherringes zur Erreichung einer kleinen Emittanz und der Forderung nach einer kompakten Maschine ausführlich behandelt. Zusammenfassend sollen hier nur zwei Punkte festgehalten werden:

1. Eine minimale Emittanz wird erreicht, wenn in der Mitte der Ablenkmagnete sowohl die Amplitudenfunktion  $\beta(x)$  als auch die Dispersionsfunktion  $\eta(x)$  ein Minimum durchlaufen ([Ro 90] und [Ma 89]).
2. Die Anpassung zu den langen geraden Strecken, in denen die Wiggler und Undulatoren eingebaut werden und zwar mit der Bedingung, daß die Dispersionsfunktion an diesen Stellen null ist, sollte mit einem Magneten durchgeführt werden, dessen Ablenkwinkel kleiner ist als der der Ablenkmagnete in den Bögen [Ei 93d].

Bei der Auslegung der Magneto-optik müssen weiterhin a) die Forderung der Nutzer nach einem hohen Photonenfluß bzw. nach einer hohen Brillianz und b) das Kostenvolumen, das möglichst gering gehalten werden sollte, berücksichtigt werden.

Der Punkt b) wird mit dem Bau einer möglichst kompakten Maschine erfüllt, der Punkt a) durch den Einbau möglichst vieler langer geraden Strecken für Wiggler und Undulatoren, sowie einen möglichst kleinen Strahlquerschnitt. Die Querschnitte des gespeicherten Strahles ergeben sich zu:

$$\sigma_i = \sqrt{\left[ \beta_i \varepsilon_i + \eta_i^2 \left( \frac{\sigma_E^2}{E^2} \right) \right]}, \quad i = x, y \quad (2.1)$$

Hierbei bedeuten:

$\sigma$  = Strahlquerschnitt (Standardabweichung)

$\varepsilon$  = Emittanz

$\beta$  = Amplitudenfunktion, Betatronfunktion

$\eta$  = Dispersionsfunktion,

$\sigma_E$  = Energieunschärfe

$E$  = Energie

Die Synchrotronstrahlungsquellen werden in einer Ebene errichtet und somit ist  $\eta(y) = 0$ . Für die Bereitstellung von Plätzen für Insertion Devices sollen die Strahlquerschnitte für zwei verschiedene Fälle untersucht werden: i)  $\eta(x) = 0$  und ii)  $\eta(x) \neq 0$ .

- i)  $\eta(x)=0$ . Mittlere Amplitudenfunktionen liegen in der Größenordnung von  $\beta(x) = 10 \text{ m/rad}$ . Mit einer Emittanz von  $30 \pi \text{ nm rad}$  ergibt sich ein Querschnitt in x-Richtung von  $\sigma(x) = 0,55 \text{ mm}$ .
- ii)  $\eta(x)\neq 0$ . Hier gelten die Voraussetzungen wie unter a.) jedoch mit der Bedingung  $\eta(x) = 0,55\text{m}$  und  $\sigma_E / E = 1,15e^{-3}$ . Hiermit ergibt sich ein Strahlquerschnitt von  $\sigma(x) = 0,84 \text{ mm}$ .

Die Brillianz im Falle ii) ist um etwa 50 % kleiner als im Falle i), wobei die Verkleinerung der Brillianz nur durch eine Strahlaufweitung in x-Richtung auftritt; in y-Richtung bleiben der Strahlquerschnitt unverändert. Bei vielen Experimenten spielt ausschließlich der Photonenfluß eine Rolle und die Brillianz ist von untergeordneter Bedeutung. Dieser Typ von Experimente kann in den Bereichen mit  $\eta(x) \neq 0$  ( Fall ii ) aufgebaut werden.

Mit der in der ersten Studie [Ro 92] eingeführten Einheitszelle und der Maßgabe, daß Insertion Devices auch an den Stellen mit endlicher Dispersionsfunktion (  $\eta(x) \neq 0$  ) aufgestellt werden können, ist es sehr einfach, zusätzlichen Platz für den Einbau von Wigglern und Undulatoren zu bekommen. Hierzu muß die Einheitszelle in der Weise verändert werden, daß am Anfang und am Ende Platz für den Einbau von Wigglern und Undulatoren vorgesehen wird. Der Speicherring wird dann modular wie folgt aufgebaut (siehe Abb. 2.1): Mehrere Einheitszellen bilden mit den Anpassungszellen und den langen geraden Stücken einen Achromaten und verschiedene Achromaten aneinandergereiht, ergeben den Speicherring. ROSY besitzt eine Viersymmetrie ( 4 Achromaten) und jeder Achromat ist aus 3 Einheitszellen, 2 Anpassungszellen und 2 langen geraden Stücken aufgebaut (siehe Abb 2.2 und 2.3). Der Gesamtaufbau des Speicherringes ROSY ist in Abb. 2.2 wiedergegeben und die wichtigsten Parameter sind in der Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Gerades	-----	Anpass.	Einheits	Einheits	Einheits	Anpass.	-----	Gerades
Stück		Zelle		Zelle		Zelle		Stück

Abb. 2.1: Schematischer Aufbau eines Achromaten des Speicherringes ROSY aus Einheits- und Anpassungszellen

Die Elektronen für den Speicherring ROSY werden in einer Glühkathode im Mikrotron erzeugt und in diesem auf 22 MeV beschleunigt. Über den ersten Transferweg gelangen die Elektronen in das Booster-Synchrotron, in dem sie in einer Zeit von 50 ms auf eine Energie von 800 MeV beschleunigt werden und über den Transferweg 2 in den Speicherring ROSY.

Der Speicherring mit einem Umfang von 148,1 m hat eine Vierersymmetrie ( 4 Achromaten ) mit geraden Strecken der Länge von 4,12 m. Diese Strecken sind ausschließlich dem Einbau von Undulatoren und Wigglern vorbehalten. In einem Achromaten befinden sich 5 Ablenkmagnete mit Ablenkwinkeln von  $20^\circ$  (  $B_2$  und  $B_M$  ) und  $15^\circ$  (  $B_1$  ). Zwischen den Ablenkmagneten  $B_2$  und  $B_M$  sind weitere gerade Stücke mit einer Länge von 3,75 m vorhanden. Diese Strecken sind vorgesehen für den Aufbau weiterer Insertion Devices, den Einbau der Cavities für die Hochfrequenz und der Injektionselemente.

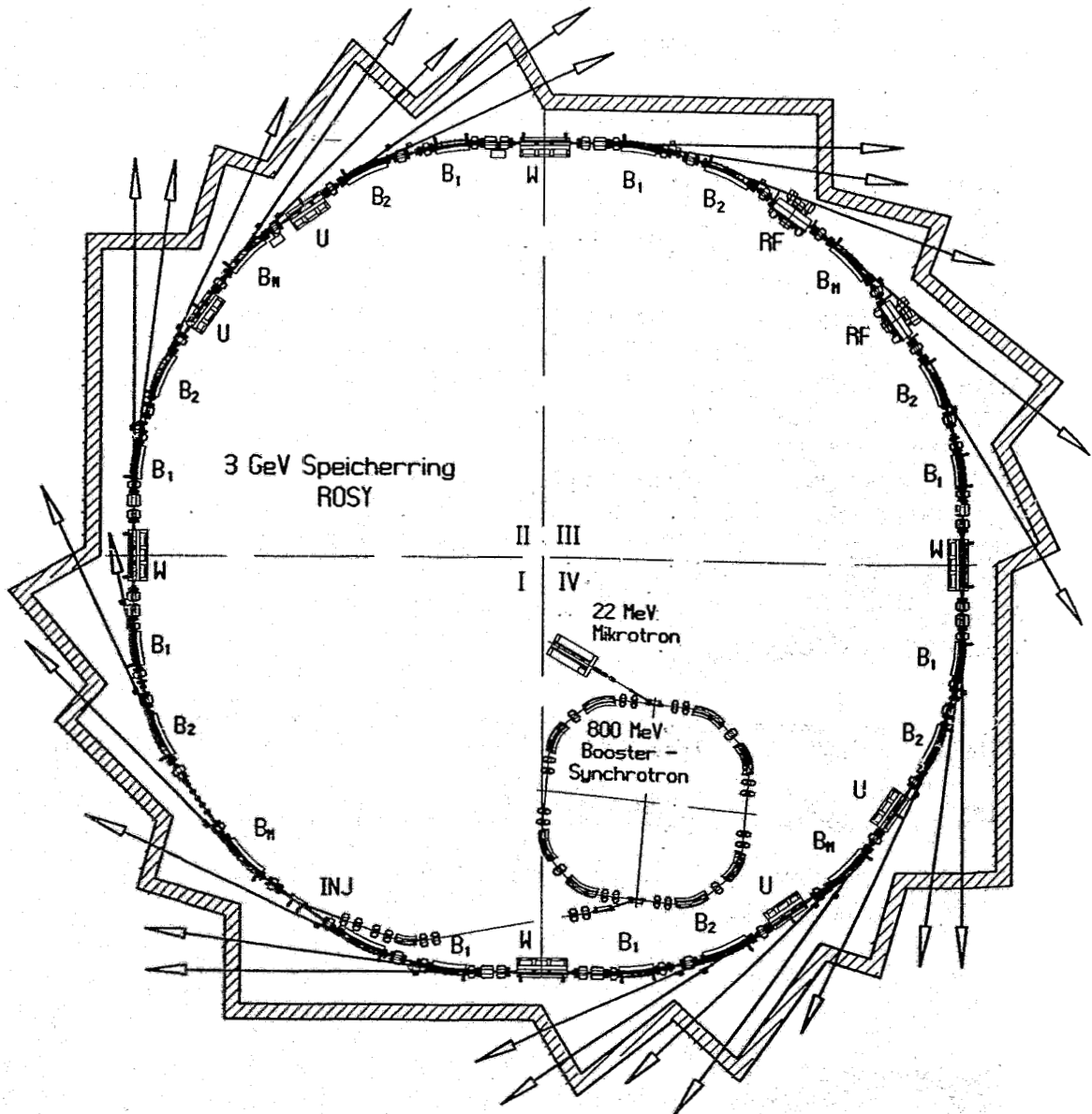


Abb. 2.2 : Der Speicherring ROSY mit dem Vorbeschleuniger ( Mikrotron ), dem 800 MeV Booster-Synchrotron, den Strahlrohren und der angrenzenden Strahlenschutzmauer.



Tabelle 2.2: Elektronenoptische Parameter des Speicherringes ROSY

kritische Energie der Strahlung $E_c$	8,4 keV
kritische Wellenlänge $\lambda_c$	0,15 nm
Elektronenenergie	3,0 GeV
Elektronenstrom	100 (später 250) mA
natürliche Emittanz	28,5 $\pi$ nm rad
Strahllebensdauer	$\geq 24$ h
Speicherringumfang	148,1 m
Speicherringstruktur	FODO (modifiziert)
Anzahl der Symmetriezellen	4
natürliche Energiebreite	0,1 %
Momentum Compaction Factor	6,6 $10^{-3}$
Hochfrequenz	352 MHz
harmonische Zahl	174
Arbeitspunkte $Q_x / Q_z$	8,84 / 4,75
natürliche Chromazität $\xi_x / \xi_z$	-18,5 / -11,1
Betatronfunktionen:	
horizontal (max/min)	17,6 / 0,59
vertikal (max/min)	18,1 / 2,1
gerade Strecken ( $\beta_x / \beta_y$ )	11,5 / 2,1 m/rad
Dispersionsfunktionen (max)	0,57 m
Dämpfungszeiten ( $\tau_x, \tau_y, \tau_z$ )	1,85 / 2,96 / 2,2 ms
Anzahl der Dipolmagnete $15^\circ / 20^\circ$	8 / 12
Biegeradius auf Orbit	7,148 m
Magnetfeld $B_{max}$ auf Orbit	1,4 T
Gradient in den Dipolmagneten	2,8283 T / m
Anzahl der Quadrupole 0,3/0,4/0,66 m	24 / 24 / 8
max. Gradient	20 T / m
Quadrupolstärke k	2 $m^{-2}$
Anzahl der Sextupole 0,1 m	56
Differentieller Gradient $G'$	500 T / $m^{-2}$
Sextupolstärke M	50 $m^{-3}$
Injektionsenergie (Booster Synchr.)	800 MeV
Pulsstrom (Booster Syn.)	10 mA
Puls-Wiederholfrequenz	10 Hz
Plätze für Wiggler und Undulatoren	4 + 4
Länge der geraden Strecken	4,12 m / 3,75 m

## 2.2 Achromat des Speicherringes ROSY

Wie unter 2.1 angegeben, besteht der Achromat von ROSY aus 3 Einheitszellen und 2 Anpassungszellen mit den langen geraden Stücken. Das Verhalten und die Parameter des Speicherringes sind im wesentlichen durch die Einheitszelle gegeben.

### 2.2.1 Einheitszelle des Achromaten

Zum Aufbau der Einheitszelle gibt es verschiedene Möglichkeiten, von denen jedoch nur die zwei bedeutendsten untersucht werden sollen: die Quadruplett-Struktur und die Dublett-Struktur.

Das magnetoptische Verhalten einer Quadruplett-Struktur wurde grundsätzlich und ausführlich für den Speicherring DELTA untersucht [DE 90], [Sc 91]. Bei DELTA sind die mittleren Quadrupole in der Einheitszelle zusammengefaßt und somit geht die Quadruplett-Struktur in eine Triplet-Struktur über. Am magnetoptischen Verhalten ändert sich jedoch grundsätzlich nichts.

Die Anordnung der Magnete in einer Quadruplett Einheitszelle und der Verlauf der Maschinenfunktionen ( $\beta(x)$ ,  $\beta(y)$  und  $\eta(x)$ ) sind in Abb. 2.3 wiedergegeben. Die  $\beta(x)$ - und die  $\eta(x)$ -Funktion durchlaufen in der Mitte des Ablenkmagneten ein Minimum und führen somit zu einer kleinen Emittanz. Entsprechend diesem Verlauf muß die  $\beta(y)$ -Funktion in der Mitte des Ablenkmagneten ein Maximum haben und am Anfang und Ende der Einheitszelle ein Minimum. Für die Beurteilung des Verhaltens der Einheitszelle sind die Faktoren: Emittanz, Chromatizität, die dynamische Apertur und der Arbeitspunkt von Bedeutung. Die Abhängigkeit dieser Größen von den Stärken der fokussierenden und defokussierenden Quadrupole sind in den nachfolgenden Abbildungen ( Abb. 2.3 bis 2.7 ) wiedergegeben.

Die Emittanz (Abb 2.4) durchläuft bei einer bestimmten Stärke des fokussierenden Quadrupoles ( $k_f(\text{opt})$ ) ein Minimum. Dies Minimum verschiebt sich mit der Stärke des defokussierenden Quadrupoles, jedoch der Wert des Minimums bleibt erhalten. Für Quadrupolstärken  $k_f$  größer als  $k_f(\text{opt})$  steigt die Emittanz schnell an. Nach Abb. 2.4 ergibt sich eine minimale Emittanz von  $\epsilon_{x0} = 35 \pi \text{ nm rad}$ .

Die Chromatizität in horizontaler Richtung ist bis zu der Quadrupolstärke, die zu einer minimalen Emittanz führt, moderat. Für Stärken  $k_f$  größer  $k_f(\text{opt})$  steigt die Chromatizität jedoch sehr schnell an. Dieses Verhalten ist positiv zu bewerten, denn somit ist es möglich, auch die minimale Emittanz der Einheitszelle in einer realen Maschine zu erhalten.

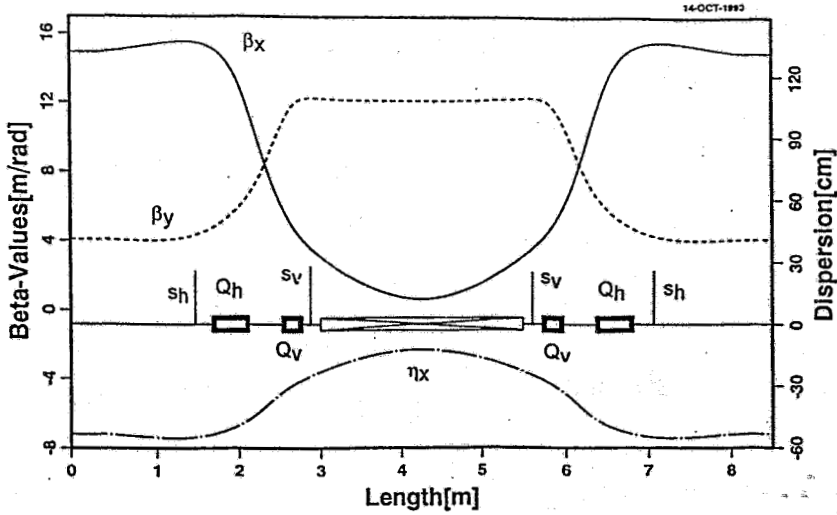


Abb. 2.3: Aufbau einer Quadruplett - Einheitszelle und Verlauf der Maschinenfunktionen innerhalb dieser Zelle

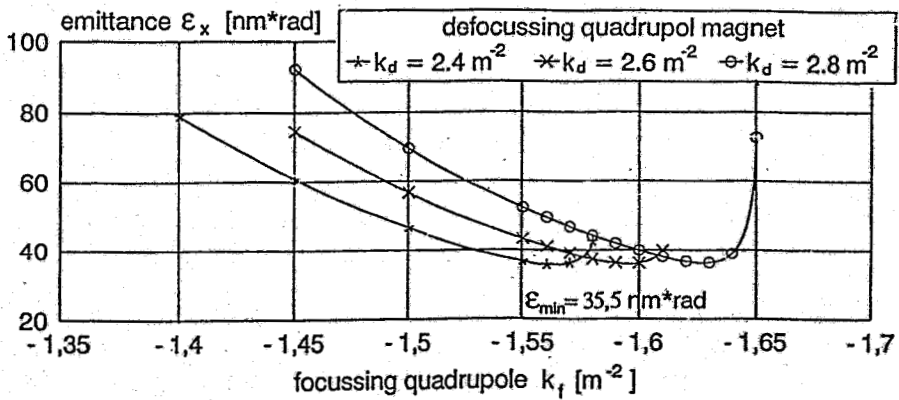


Abb. 2.4: Abhängigkeit der Emittanz der Einheitszelle von den Stärken der Quadrupole.

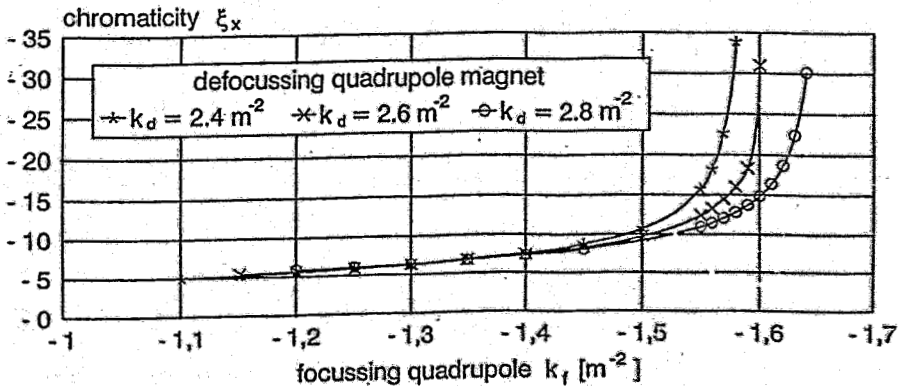


Abb. 2.5: Abhängigkeit der horizontalen Chromatizität der Einheitszelle von den Stärken der Quadrupole.

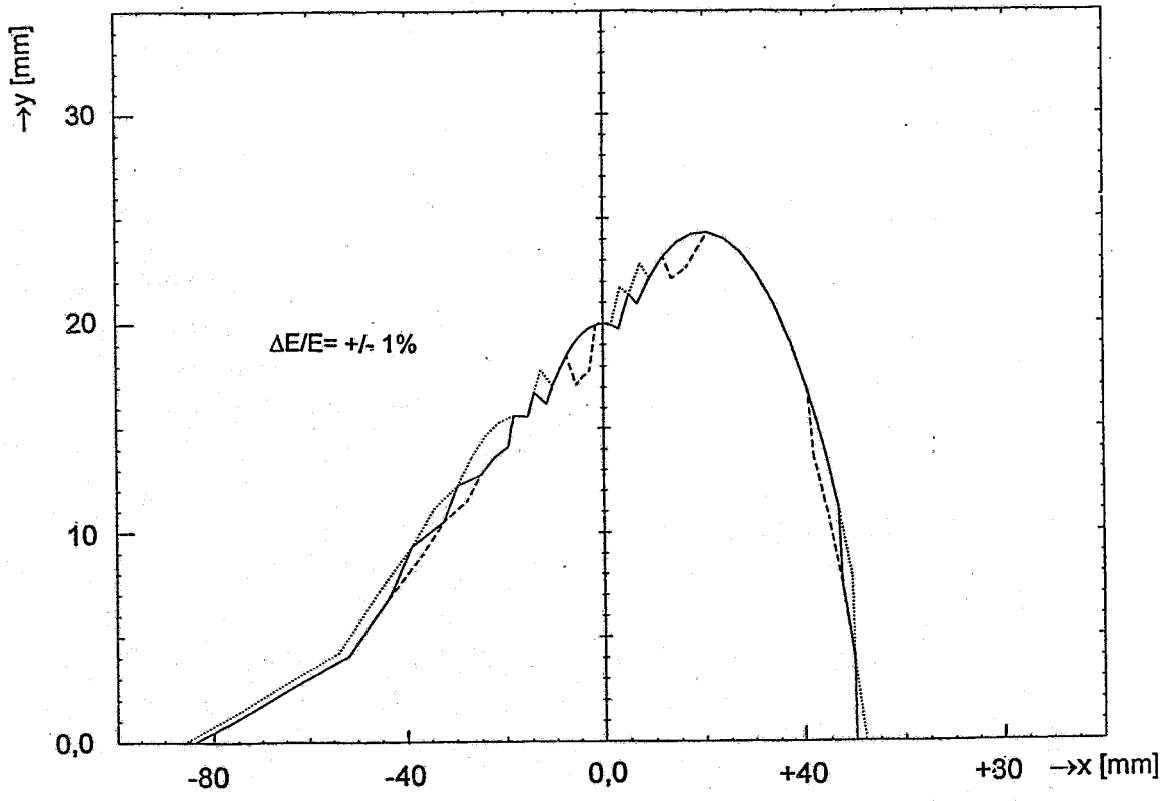


Abb. 2.6: Die dynamische Apertur der Einheitszelle bei minimaler Emittanz

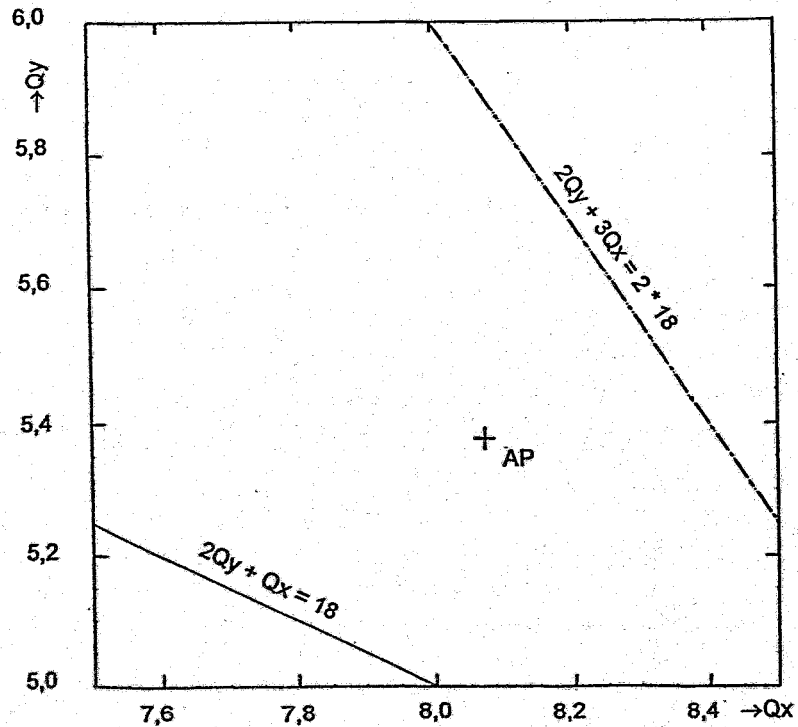


Abb. 2.7: Resonanzdiagramm der Einheitszelle mit dem Arbeitspunkt einer minimalen Emittanz.

Die minimale Emittanz bei einer solchen Anordnung berechnet sich nach [Ro 90] und [Ma 89] zu:

$$\varepsilon_{x0} = C_q \gamma^2 \frac{1}{J_x} \frac{1}{12\sqrt{15}} \varphi_0^3 \quad (2.2)$$

Hierbei bedeuten:

- $C_q$  = Konstante =  $3,84 \cdot 10^{-13}$  m rad
- $\gamma$  = reduzierte Energie =  $E/m_e c^2$
- $J_x$  = Dämpfungskonstante
- $\varphi_0$  = Ablenkwinkel

Durch Einsetzen der Werte für die Quadruplett-Einheitszelle ergibt sich hieraus ein Wert von

$$\varepsilon_{x0} = 12 \pi \text{ nm rad.}$$

Dieser Wert ist um den Faktor 3 kleiner als der minimale Wert in Abb. 2.4. Der Unterschied zwischen diesen beiden Werten liegt darin, daß der in Abb. 2.4 wiedergegebene unter realen Bedingungen errechnet wurde. Die realen Bedingungen sind hier, daß die Ableitungen der Funktionen  $\beta(x)$ ,  $\beta(y)$  und  $\eta(x)$  am Anfang und am Ende der Zelle null sein müssen. Bei der Ableitung der Formel (2.2) wird lediglich von einem Minimum der Funktionen in der Mitte des Magneten ausgegangen und dann nach einer minimalen Emittanz optimiert. Hiermit ist gezeigt, daß aufgrund der realen Grenzbedingungen die nach Formel (2.2) errechnete minimale Emittanz nicht erreicht werden kann.

Die dynamische Apertur der Einheitszelle ( siehe Abb. 2.6 ) ist ausreichend, sie ist in beiden Richtungen ( horizontal und vertikal ) größer als die physikalische Apertur. Dies hängt sehr stark von der Lage des Arbeitspunktes ab ( siehe Abb. 2.7 ). Wegen der hohen Periodizität liegen in der Nähe des Arbeitspunktes nur zwei Resonanzlinien, wobei die eine eine Drittelresonanz und die andere eine Fünftelresonanz ist.

Der Aufbau der Einheitszelle kann vereinfacht werden, wenn die defokussierende Wirkung des Quadrupoles mit in den Ablenkmagneten verlegt wird. Damit wird aus der Quadruplett-Struktur eine Dublett-Struktur mit zwei positiven Bewertungen:

1. Pro Einheitszelle werden 2 Quadrupole mit einem dazugehörenden Netzgerät weniger benötigt.
2. Die Dämpfungsfunktion  $J_x$  wird größer eins und damit wird die Emittanz um diesen Wert kleiner.  $J_x$  liegt in der Größenordnung von 1,5.

Die Anordnung der Magnete und der Verlauf der Maschinenfunktionen in der Einheitszelle mit Dublett-Struktur ist in Abb. 2.8 wiedergegeben. Im Vergleich zur Quadruplett-Struktur ( Abb. 2.3 ) ergeben sich keine großen Unterschiede.

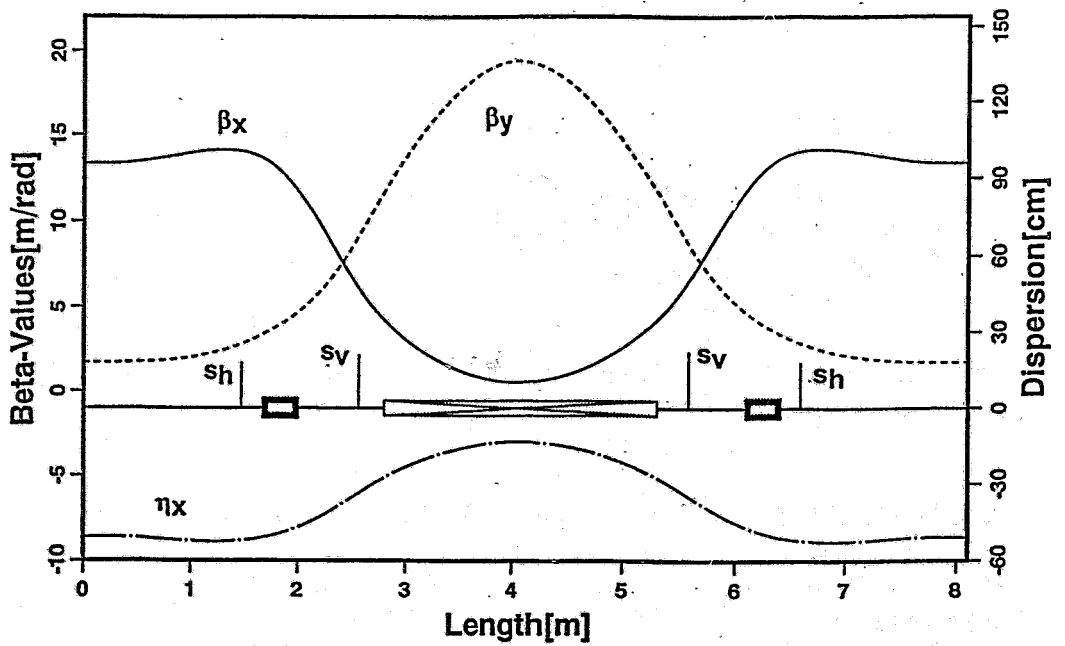


Abb. 2.8: Aufbau einer Einheitszelle mit Dublett-Struktur und der Verlauf der Maschinenfunktionen innerhalb der Einheitszelle

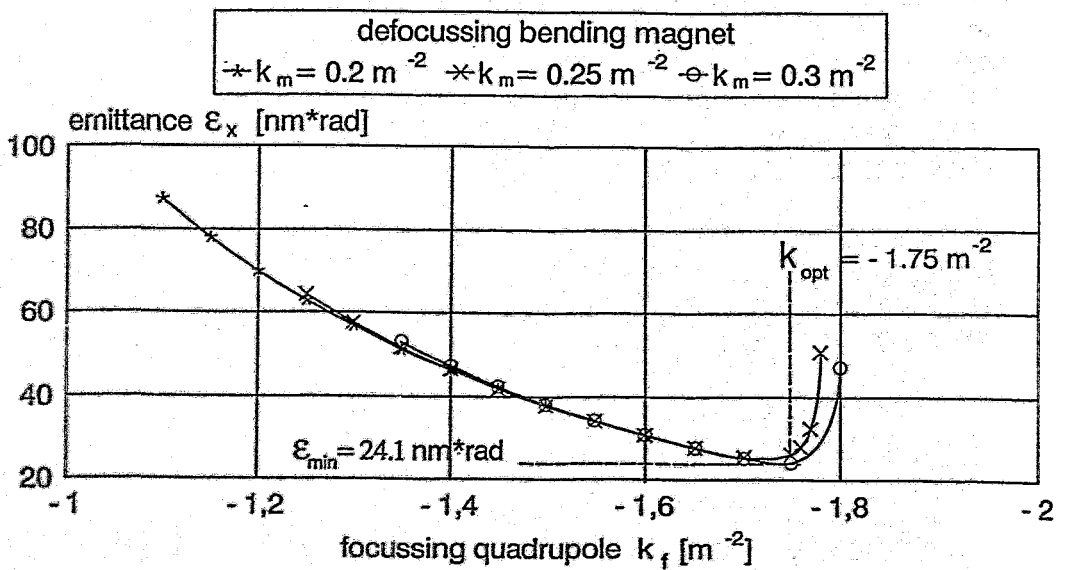


Abb. 2.9: Abhängigkeit der Emittanz der Einheitszelle mit Dublett-Struktur von den Quadrupolstärken der Magnete.

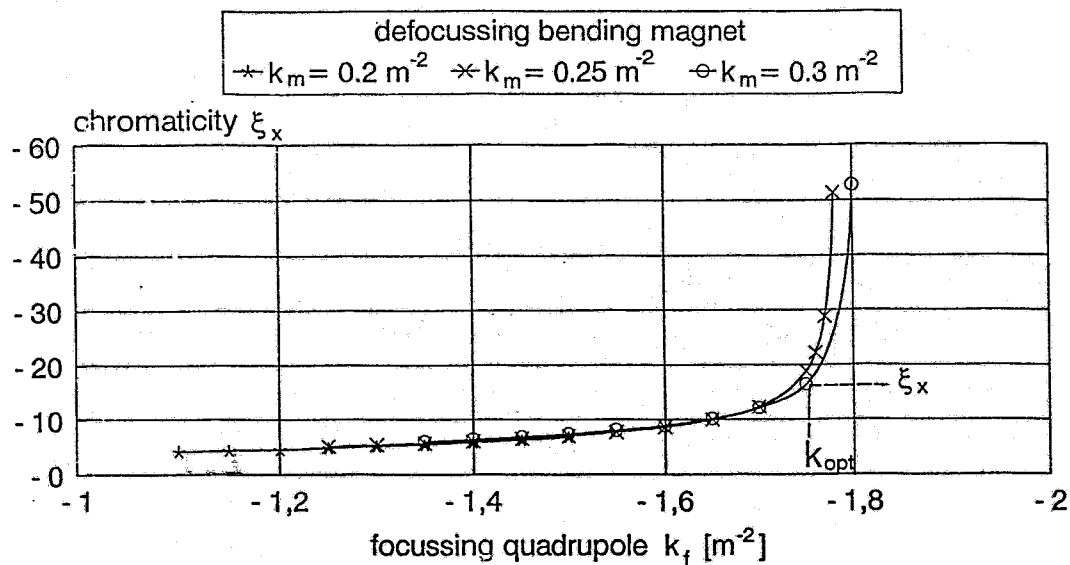


Abb. 2.10: Abhängigkeit der horizontalen Chromatizität der Einheitszelle mit Dublett-Struktur von den Quadrupolstärken der Magnete

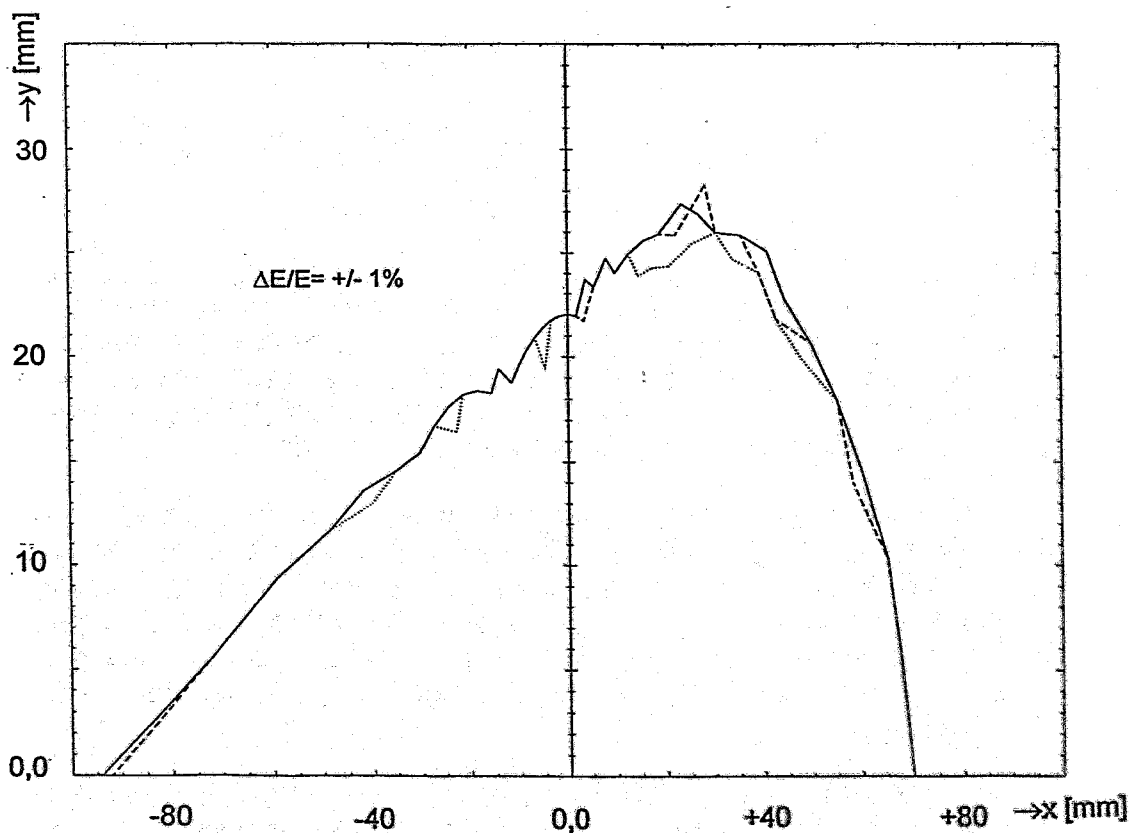


Abb. 2.11: Die dynamische Apertur der Einheitszelle mit Dublett-Struktur bei minimaler Emittanz.

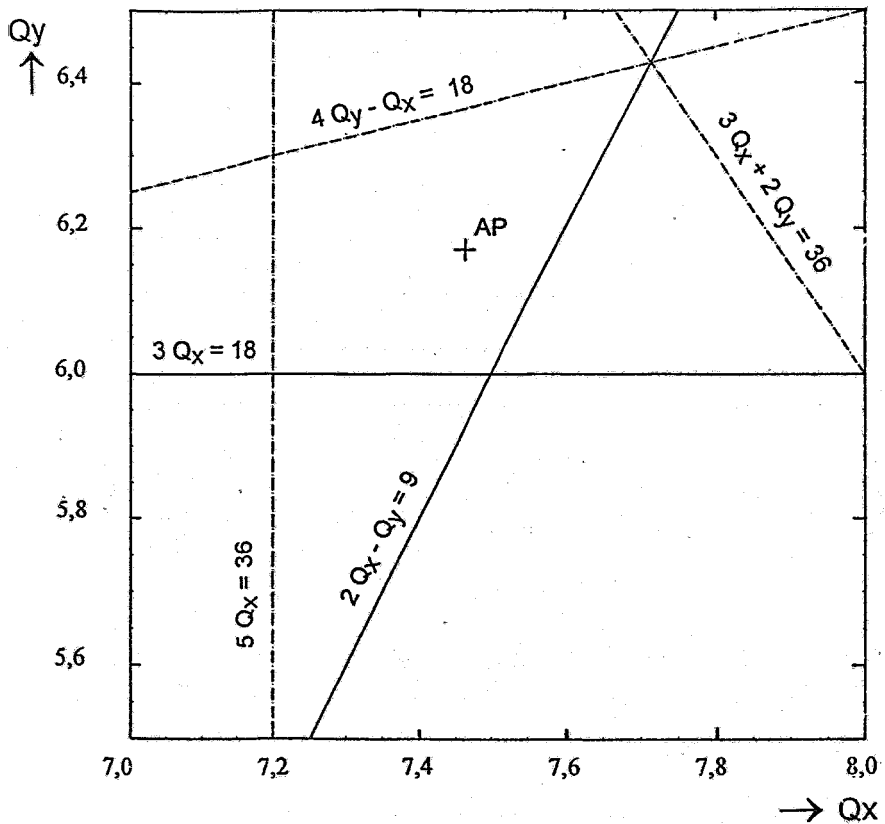


Abb. 2.12: Resonanzdiagramm der Speicherringes aufgebaut aus 18 Einheitszellen mit Dublett-Struktur.

Der Verlauf der Emittanz als Funktion der Stärke des fokussierenden Quadrupols ist in Abb. 2.9 dargestellt. Auch hier wird wieder bei einer ganz bestimmten Quadrupolstärke  $k(\text{opt})$  ein Minimum durchlaufen. In diesem Falle ist die minimal erreichbare Emittanz 24,1 nm rad, d.h. um etwa den Faktor 1,5 kleiner als bei der Quadruplett-Struktur. Wie bereits weiter oben angegeben ist dies der Einfluß der Dämpfungsfunktion  $J_x$  auf die Emittanz.

Auch bei der Dublett-Struktur steigt die horizontale Chromatizität erst mit Quadrupolstärken größer als  $k(\text{opt})$  an und somit ist auch in der Einheitszelle mit Dublett-Struktur die minimale Emittanz erreichbar. Das Resonanzdiagramm für einen Speicherring, aufgebaut aus 18 Einheitszellen mit Dublett-Struktur, ist in Abb. 2.12 und die zugehörige dynamische Apertur in Abb. 2.11 wiedergegeben. Auch hier ergeben sich ähnliche Verhältnisse wie bei der Quadruplett-Struktur.

Für den Speicherring ROSY wurde als Einheitszelle die Dublett-Struktur verwendet, da sie das gleiche Verhalten wie die Quadruplett-Struktur zeigt; jedoch mit der Dublett-Struktur sich eine kleinere Emittanz erreichen läßt und die Maschine kompakter und billiger gebaut werden kann.



### 2.2.2 Aufbau des Achromaten

Wegen der Kompaktheit sollte die Synchrotronstrahlungsquelle ROSY aus vier Achromaten aufgebaut werden, wobei ein Achromat aus drei Einheitszellen, zwei Anpassungszellen und zwei langen geraden Stücken besteht (siehe Abb. 2.1). Unter der Annahme, daß die Anpassungszellen die halbe Ablenkung der Einheitszellen durchführen, ergibt sich für die Einheitszelle ein Ablenkwinkel von  $22,5^\circ$  und für die Anpassungszelle von  $11,25^\circ$ . Die Untersuchungen zum LISA-Projekt [Ei 92] haben gezeigt, daß eine kleinere Emittanz erreicht werden kann, wenn der Ablenkwinkel in der Anpassungszelle größer gemacht wird. Dies wurde bei den Rechnungen zu ROSY bestätigt und ist in Übereinstimmung mit den Rechnungen von Wrulich [Wr 92]. Deshalb wurden für den Achromaten von ROSY folgende Ablenkwinkel gewählt: Anpassungszelle  $15^\circ$  und Einheitszelle  $20^\circ$ .

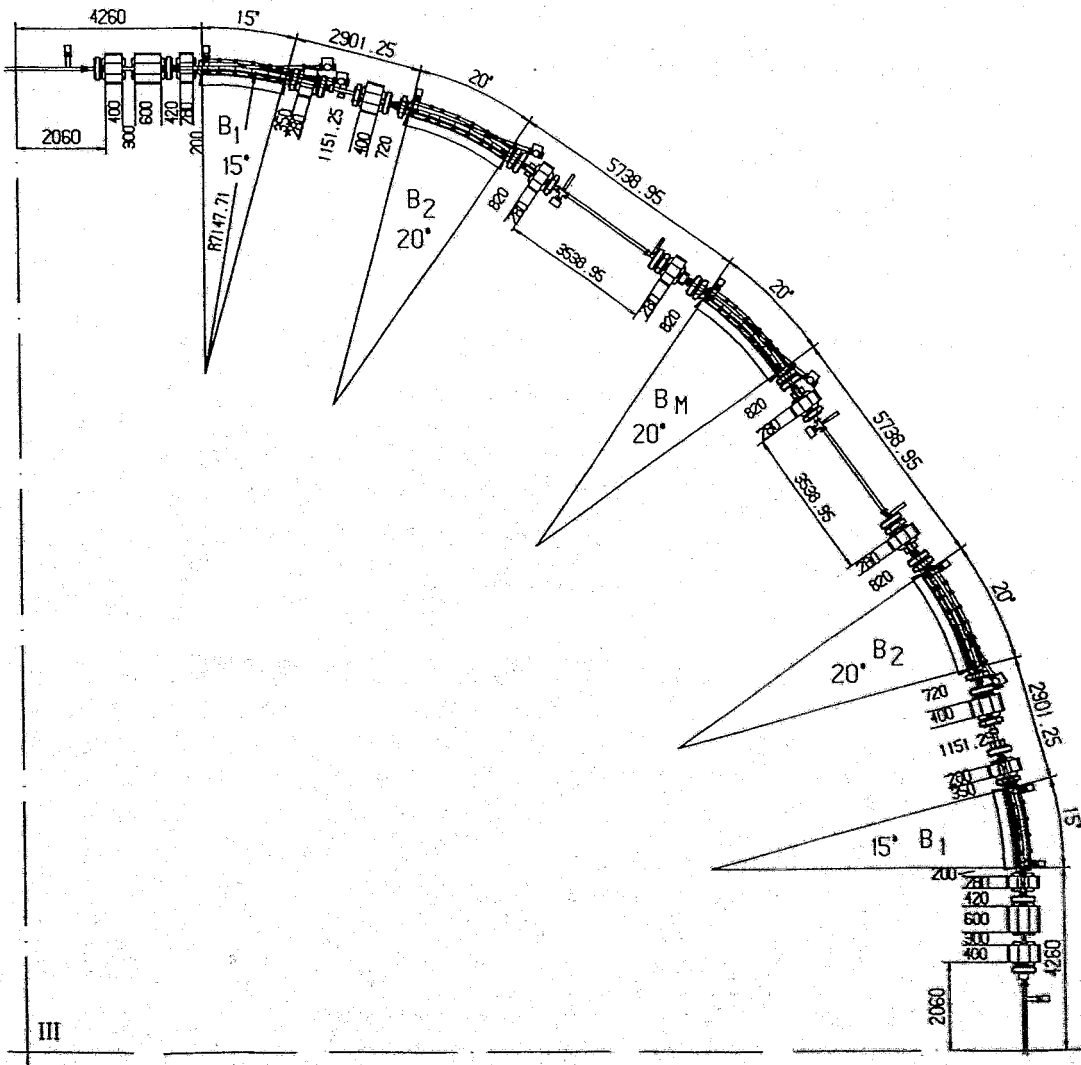


Abb. 2.13: Magnetanordnung in einem Achromaten des Speicherringes ROSY.

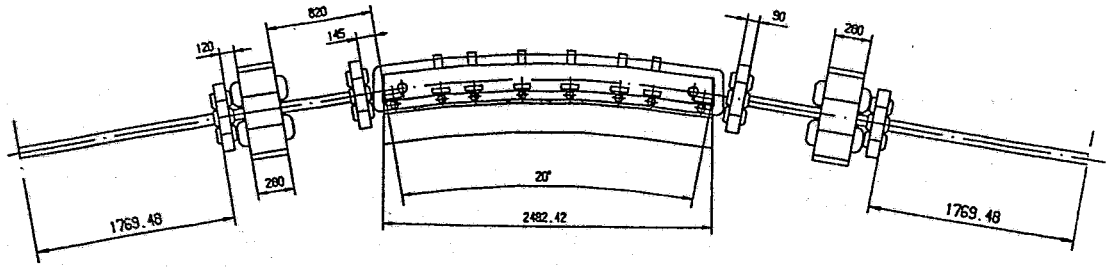


Abb. 2.14: Magnetanordnung in einer Einheitszelle des Achromaten.

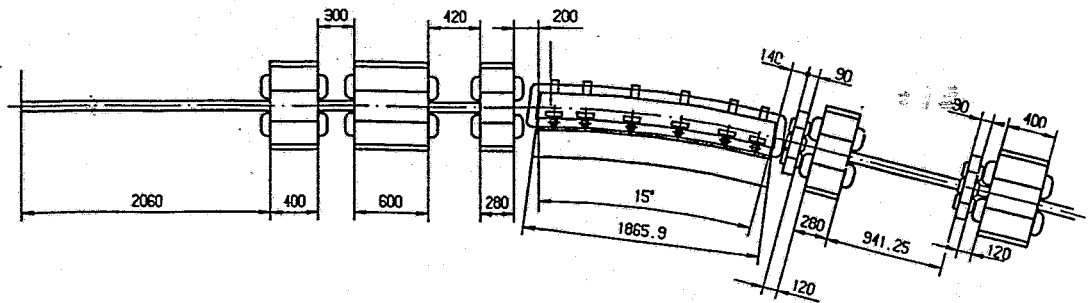


Abb. 2.15: Magnetanordnung in der Anpassungszelle des Achromaten.

Gerade Strecke

$$\eta_x = 0$$

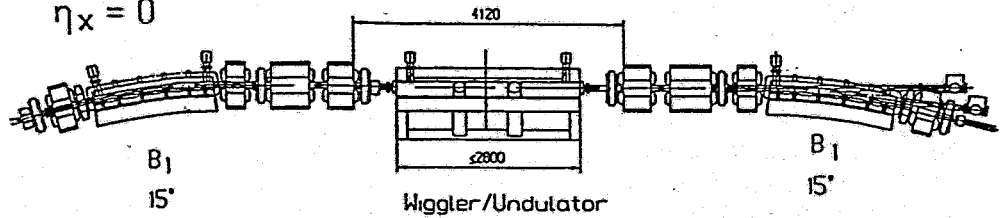


Abb. 2.16: Anordnung der Magnete in den langen geraden Stücken.

Bogen

$$\eta_x \neq 0$$

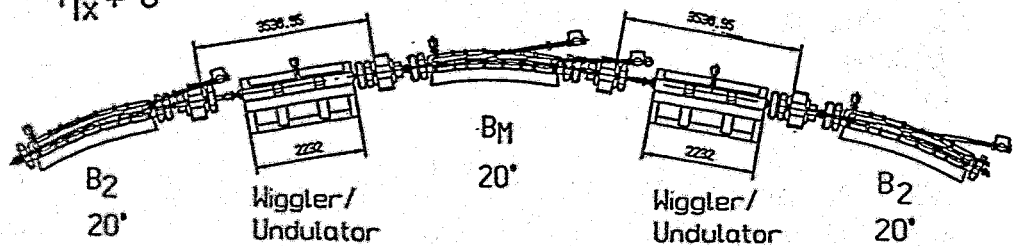


Abb. 2.17: Platzverhältnisse für den Einbau von Wiggler und Undulatoren in dem Bogen des Achromaten.

Für die magnetische Flußdichte wurde bei der nominellen Energie ein Wert von 1,4 T gewählt, dies entspricht einem Mittelwert zwischen ALS und ELETTRA. Hiermit ergibt sich ein Radius in den Ablenkmagneten von  $\rho = 7,14771$  m. Die magnetoptischen Rechnungen zur Anpassung der Einheitszelle an die Bedingungen in der langen geraden Strecke ( $\eta(x)=0, \eta'(x)=0, \beta'(x)=0$  und  $\beta'(y)=0$ ) haben gezeigt, daß in den langen geraden Strecken ein Triplett-Quadrupol-System und zwischen dem Anpassungsmagneten und dem in der Einheitszelle ein Dublett-Quadrupol-System benötigt werden. Die sich somit ergebende Magnetstruktur in einem Achromaten ist in Abb. 2.13 wiedergegeben. Der magnetische Aufbau der Einheitszelle und der Anpassungszelle ist in den Abb. 2.14 und 2.15, die Platzverhältnisse für den Einbau der Wiggler und Undulatoren im langen geraden Stück und in den Bögen der Achromaten sind in den Abb. 2.16 und 2.17 dargestellt.

### 2.2.3 Magnetoptisches Verhalten des Achromaten

Der Verlauf der Maschinenfunktionen  $\beta(x), \beta(y)$  und  $\eta(x)$  in dem Achromaten von ROSY ist in Abb. 2.18 als Beispiel der ausgewählten Optik ROSY I wiedergegeben. Am Anfang des Achromaten und am Ende ist die Dispersionsfunktion  $\eta(x)$  und ihre Ableitung  $\eta'(x)$  gleich null. Die Amplitudenfunktion in y-Richtung  $\beta(y)$  sollte im geraden Stück, zur Erreichung eines kleinen Querschnittes, minimale Werte und die Betatronfunktion in x-Richtung  $\beta(x)$  sollte Werte um etwa 10 m/rad haben. In der Mitte des Achromaten müssen wegen der Symmetriebedingung die Ableitungen aller Maschinenfunktionen null sein. Mit den drei Maschinenfunktionen und ihren Ableitungen müssen insgesamt sechs Parameter angepaßt werden. Entsprechend der Abb. 2.13 sind in einem Achromaten sechs unabhängige Quadrupolfamilien und ein defokussierendes Element im Ablenkmagneten vorhanden. Dementsprechend muß es möglich sein, mit diesen sechs Quadrupolfamilien die Maschinenfunktionen entsprechend den gewünschten sechs Parametern einzustellen.

In der Tat zeigt der hier vorgeschlagene Achromat, trotz des festen Gradienten im Ablenkmagneten, eine hohe Flexibilität. Dies läßt sich am besten im Resonanzdiagramm darstellen, wenn in diesem alle mit der Magnetoptik erreichbaren Arbeitspunkte eingetragen werden. In Abb. 2.19 sind die Arbeitspunkte der untersuchten Optiken wiedergegeben. Untersuchte Optiken heißt in diesem Falle: Es wurden die Hauptparameter der Optik ausgerechnet und es wurden einige Untersuchungen zur dynamischen Apertur gemacht. Entsprechend den Hauptresonanzlinien wurde das in Abb. 2.19 dargestellte Resonanzdiagramm in 5 Bereiche aufgeteilt (Optik 1 bis Optik 4) und für jeden wurde eine optimale Optik gesucht. Hierbei muß unterschieden werden zwischen einer kleinen Emittanz und einer großen dynamischen Apertur. Optimale Optiken, d.h. mit kleiner Emittanz und großer dynamischer Apertur wurden jedoch nur in den Bereichen Optik 2 und Optik 1 gefunden. Die Optik ROSY I (siehe Abb. 2.19), liegt mit den Arbeitspunkten  $Q_x = 8,724$  und  $Q_z = 5,134$  im untersuchten Bereich der Optik 2.

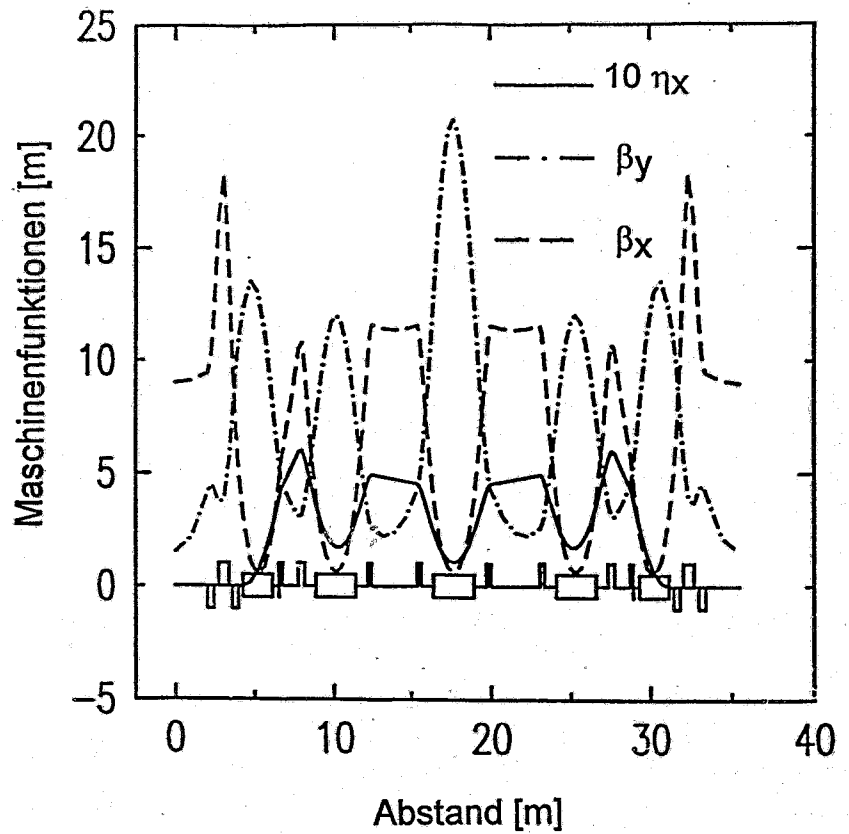


Abb. 2.18: Verlauf der Maschinenfunktionen im Achromaten von ROSY für die Optik ROSY I.

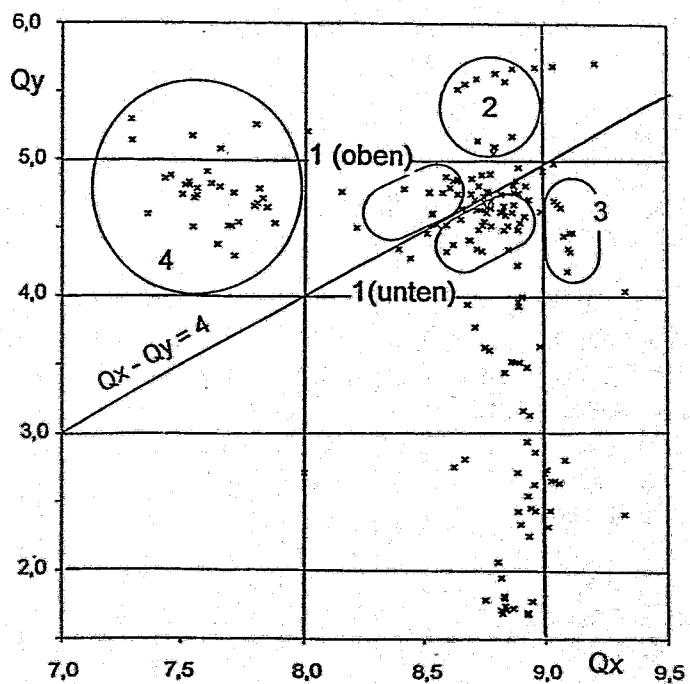


Abb. 2.19: Resonanzdiagramm mit den Arbeitspunkten der untersuchten Optiken und der verschiedenen Optikbereiche.

Für die Optik ROSY I wurden fünf verschiedene Sextupoleinstellungen gewählt um eine möglichst große dynamische Apertur zu finden. Die Anordnung der Sextupole ist in Abb. 2.20 und die zugehörige dynamische Apertur in Abb. 2.21 wiedergegeben. Aus diesen Ergebnissen folgt, daß je nach Sextupoleinstellung eine relativ große dynamische Apertur in vertikaler oder horizontaler Richtung erreicht werden kann.

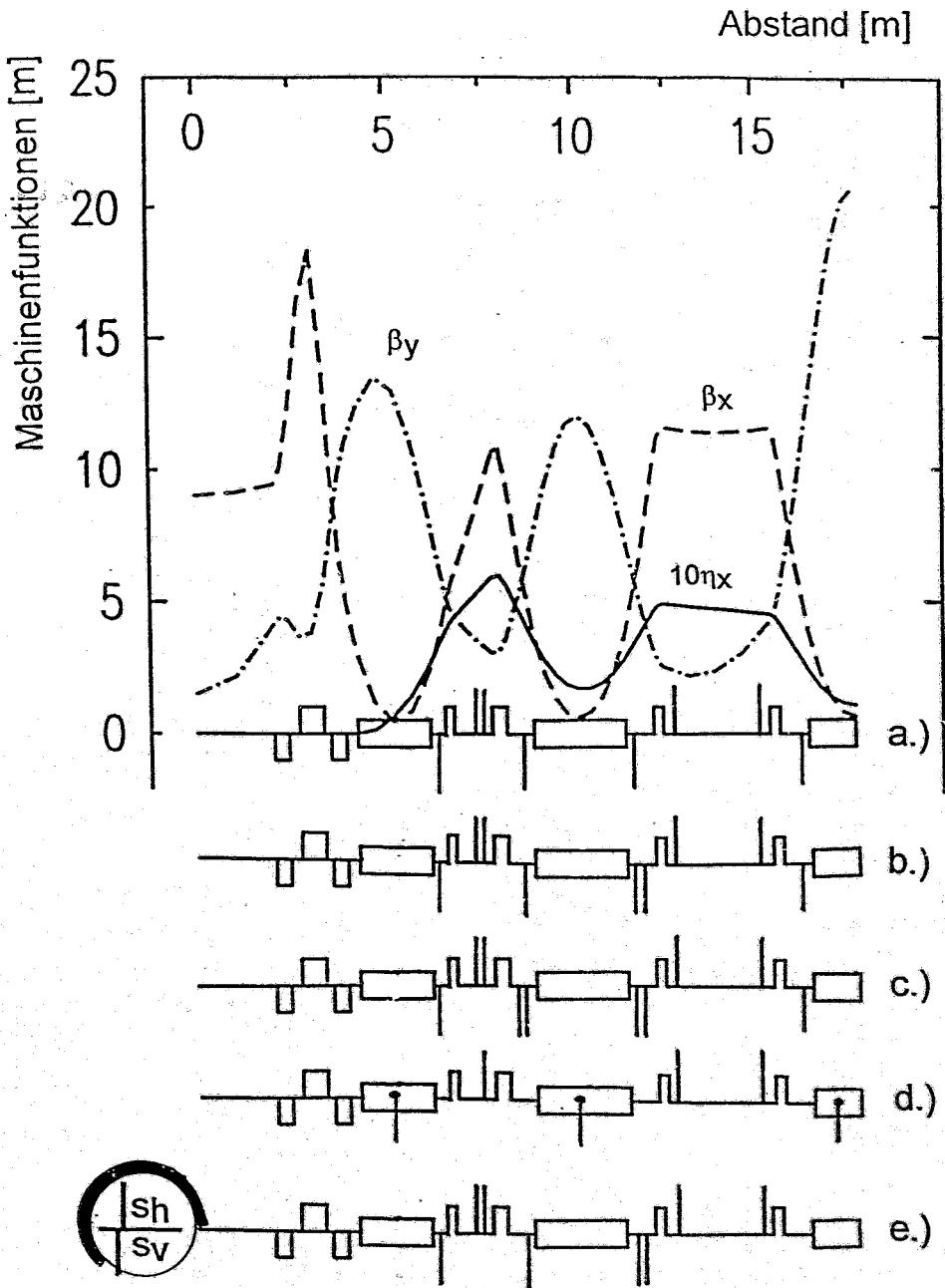


Abb. 2.20: Anordnung der Sextupole zur Untersuchung auf eine optimale dynamische Apertur.

### ROSY dynamic aperture (100 turns)

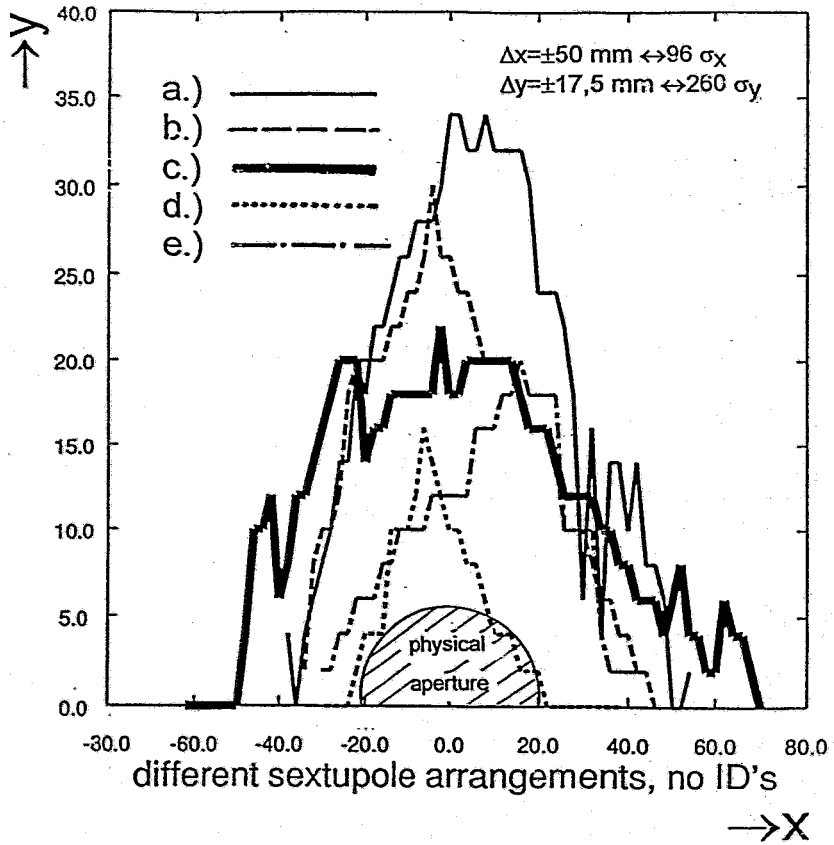


Abb. 2.21: Dynamische Apertur für die in Abb. 2.20 angegebenen Sextupolanordnungen

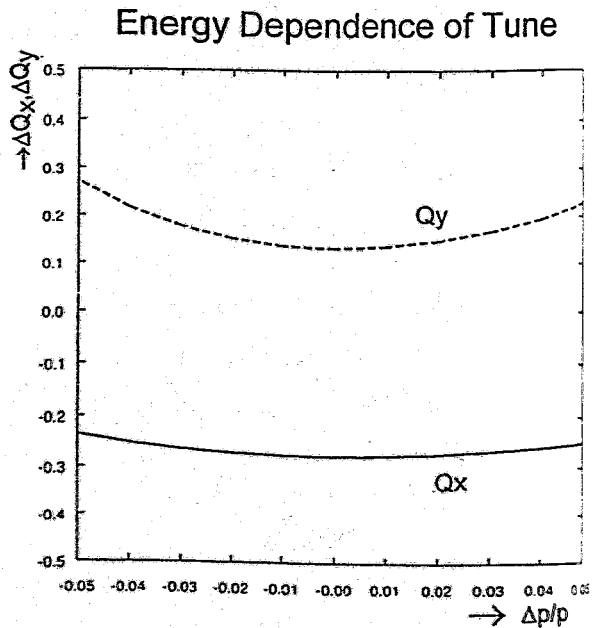
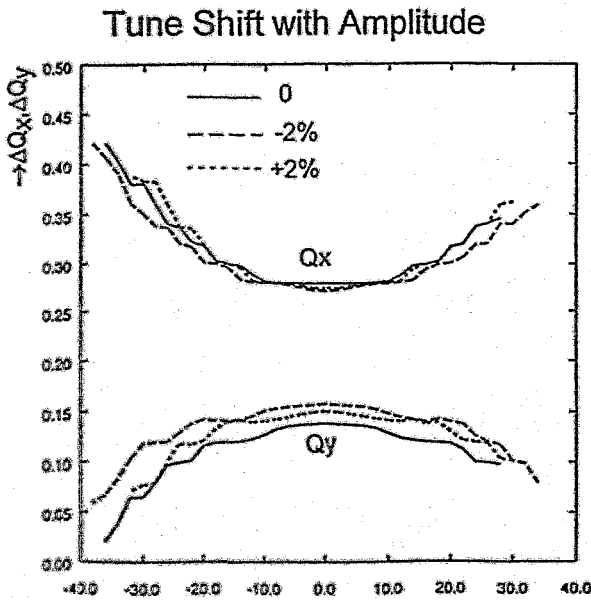


Abb. 2.22: Die Abhängigkeit des Arbeitspunktes von der Energie und der Amplitude des Elektronenstrahles.

Auffallend ist jedoch, daß die dynamische Apertur am kleinsten ist, wenn die Sextupole, die die Chromatizitätskompensation in vertikaler Richtung durchführen, direkt in den Ablenkmagneten eingebaut werden. Dieses Ergebnis ist wohl dadurch zu deuten, daß die Dispersionsfunktion in den Ablenkmagneten relativ klein ist und somit die notwendige Sextupolstärke relativ groß wird. Die Veränderung des Arbeitspunktes mit der Energie und der Amplitude sind in der Abb. 2.22 dargestellt.

Eine nicht zu vernachlässigende Einschränkung der dynamischen Apertur ergibt sich beim Einbau von Undulatoren und Wiggeln, sowie der Berücksichtigung der Strecken, die für die Hochfrequenz-Cavities und für die Injektion benötigt werden. Hierdurch wird die ursprüngliche Periodizität  $P = 4$  um den Faktor 2, auf  $P = 2$  vermindert. Untersuchungen zum Arbeitspunkt müssen zeigen, ob die Wahl eines anderen Arbeitspunktes vielleicht vorteilhafter ist.

### 2.3 Untersuchungen zum Arbeitspunkt

Der im Speicherring umlaufende Elektronenstrahl vollführt Schwingungen (Betatronschwingungen). Der Strahl geht durch die Anregung von Resonanzen verloren, wenn der gewählte Arbeitspunkt auf einer Resonanzlinie liegt. Die Resonanzlinien sind durch folgendes Gleichungssystem gegeben:

$$l * Q_x + m * Q_y = n * P \quad (2.3)$$

Hierbei sind  $l$ ,  $m$  und  $n$  ganze Zahlen und die Summe aus  $|l| + |m|$  wird als Ordnung der Resonanz bezeichnet.  $P$  ist die Periodizität des Beschleunigers. Die Resonanzen der niedrigsten Ordnung und die Summenresonanzen führen zu einem Strahlverlust und sollten (müssen) vermieden werden.

Mit der Vierersymmetrie hat ROSY eine Periodizität von  $P = 4$ . Durch den Einbau von Wiggeln und Undulatoren, sowie die Hochfrequenz-Cavities und das Vorhalten einer geraden Strecke für die Injektion führt dazu, daß die Periodizität um den Faktor 2 vermindert wird. Somit müssen für die Betrachtungen des Arbeitspunktes die Periodizitäten  $P = 4$  und  $P = 2$  untersucht werden. Die entsprechenden Resonanzdiagramme mit den Resonanzlinien der verschiedenen Ordnung sind in den Abb. 2.23 und 2.24 wiedergegeben. In diesen Diagrammen sind zwei Arbeitspunkte eingetragen:

$$\begin{aligned} \text{ROSY I:} & \quad Q_x = 8,724 \text{ und } Q_y = 5,134 \\ \text{ROSY A:} & \quad Q_x = 8,840 \text{ und } Q_y = 4,748 \end{aligned}$$

ROSY I ist die Optik, mit der bisher alle Rechnungen durchgeführt wurden, der Arbeitspunkt der Optik "ROSY A" wurde von J. Murphy [Mu 93] vorgeschlagen.

Resonanzen erster Ordnung treten bei Fehlern in den Ablenkmagneten und die der zweiten Ordnung bei Fehlern in den Quadrupolen auf. Die Resonanzen erster Ordnung werden angeregt durch ganzzahlige und die der zweiten Ordnung durch halbzahlige Arbeitspunkte. Beide Arbeitspunkte (ROSY I und ROSY A) vermeiden diese Resonanzlinien.

Die größte Störung, die in den Speicherring gebracht wird, ist die durch den Einbau von Sextupolen. Die wichtigsten Resonanzlinien, die zum Verlust des Strahles, beim Vorhandensein von Sextupolfeldern führen können, sind:

$$3 * Q_x = n * P, \quad (2.4)$$

$$Q_x + 2 * Q_y = n * P \quad \text{und} \quad (2.5)$$

$$Q_x - 2 * Q_y = n * P \quad (2.6)$$

Die Gleichung (2.4) führt zu den Resonanzlinien:

$$P = 4: \quad Q_x = 6,66; 8,0 \text{ und } 9,33$$

$$P = 2: \quad Q_x = 6,66; 7,33; 8,0; 8,66 \text{ und } 9,33$$

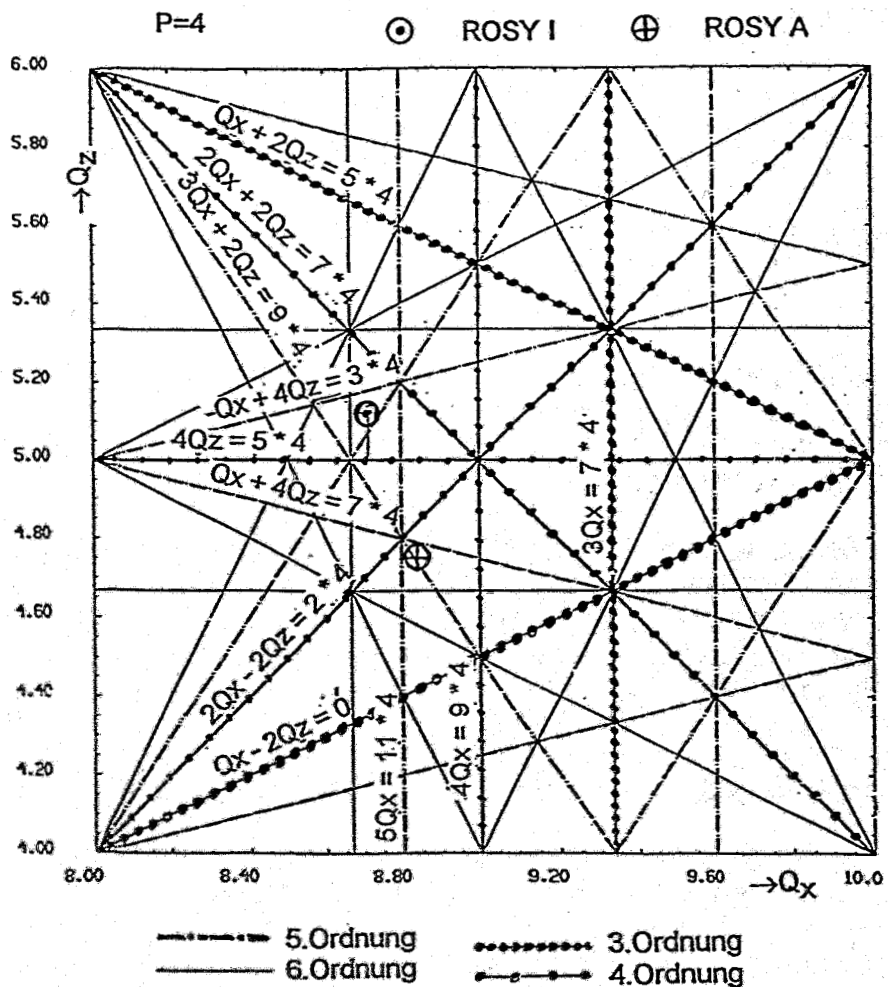


Abb. 2.23: Resonanzdiagramm des Speicherringes ROSY mit den Resonanzen für eine Periodizität  $P = 4$



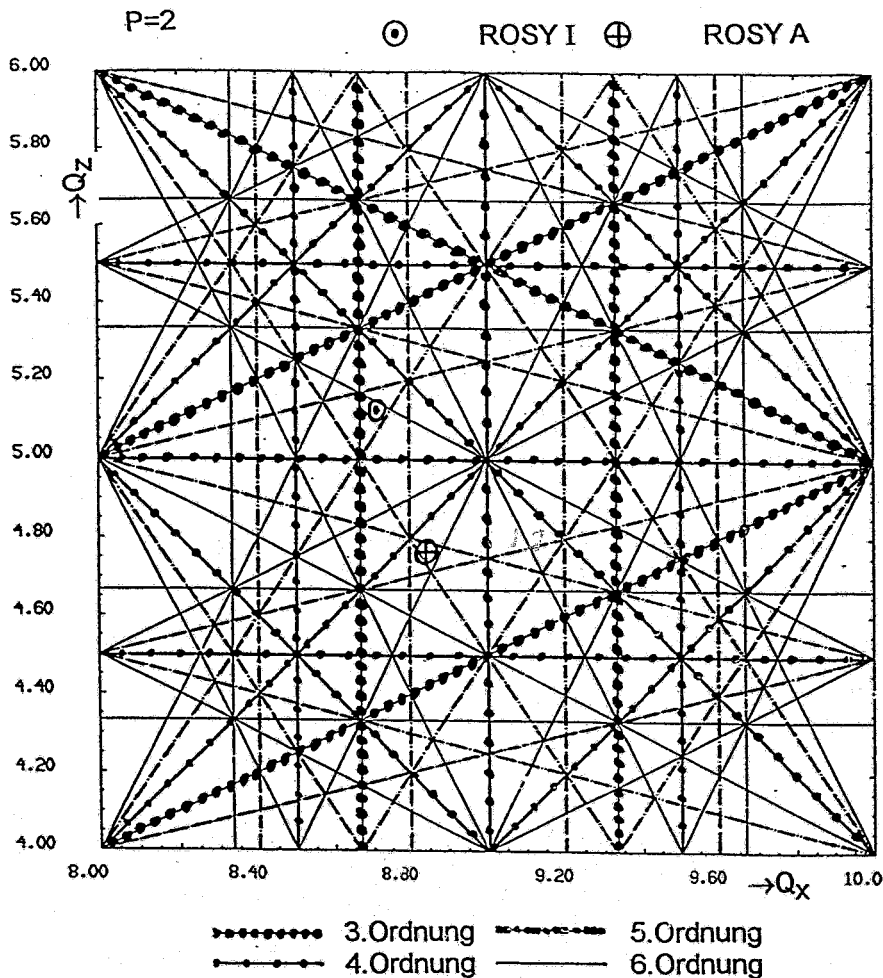


Abb. 2.24: Resonanzdiagramm für den Speicherring ROSY mit den Resonanzlinien für die Periodizität  $P = 2$

Somit liegt der gewählte Arbeitspunkt der Optik ROSY I ( $Q_x = 8,724$ ) in der Nachbarschaft der Resonanzlinie  $Q_x = 8,66$  bei einer Periodizität  $P = 2$  (siehe Abb. 2.24).

Für die Summen- und Differenzresonanzen nach Gl. (2.5) und Gl. (2.6) sind folgende Linien von Bedeutung:

$$P = 4: \quad \begin{aligned} Q_x + 2 \cdot Q_y &= 16 \text{ und } 20 \\ Q_x - 2 \cdot Q_y &= -4 \text{ und } 0 \end{aligned}$$

$$P = 2: \quad \begin{aligned} Q_x + 2 \cdot Q_y &= 16, 18 \text{ und } 20 \\ Q_x - 2 \cdot Q_y &= -4, -2 \text{ und } 0 \end{aligned}$$

Diese Linien sind ebenfalls in den Abb. 2.23 und 2.24 eingetragen und es ergibt sich ein ausreichender Abstand zwischen dem Arbeitspunkt (ROSY I) und diesen Linien. Insgesamt kann zu den drei Resonanzen festgestellt werden, daß sich für den Arbeitspunkt von ROSY I Probleme bei der

Periodizität 2 ergeben könnten, da  $Q_x = 8,724$  in der Nachbarschaft der Resonanzlinie  $3*Q_x = 26$  liegt.

Aus der Abb. 2.24 ist noch zu entnehmen, daß der Arbeitspunkt von der Optik ROSY I ebenfalls in der Nachbarschaft der Resonanzlinie der 4. Ordnung:  $2*Q_x + 2*Q_y = 28$  liegt.

Trackingrechnungen müssen nun zeigen, ob die genannten Resonanzlinien zu einer ausreichenden dynamischen Apertur führen. Unabhängig hiervon wurde jedoch eine andere Optik gewählt, um sich zumindest von der 3. Resonanz:  $3*Q_x = 26$ , bei einer Periodizität  $P = 2$ , wegzubewegen. Der Arbeitspunkt dieser Optik ROSY A liegt bei  $Q_x = 8,840$  und  $Q_z = 4,748$ . Auch bei diesem Arbeitspunkt kann es bei den höheren Harmonischen zu Problemen kommen. Die Trackingrechnungen müssen letztendlich zeigen, welcher Arbeitspunkt zu der größten dynamischen Apertur führt.

Bei den Trackingrechnungen wurde jedoch zuerst von der Optik ROSY A ausgegangen.

## 2.4 Dynamische Apertur des Speicherringes ROSY

Die Berechnung der dynamischen Apertur wurde in zwei Schritten durchgeführt:

1. Berechnung nur unter Berücksichtigung der Sextupole, und
2. Berechnung unter Berücksichtigung der Multipolfelder in den Dipolen und Quadrupolen

### 2.4.1 Wahl der Sextupolanordnung

Durch den Einbau von Sextupolen, die die Chromatizitätskompensation durchführen, werden in den Speicherring Störungen eingebaut und die Trackingrechnungen zeigen, ab wann diese Störungen zu einem Strahlverlust führen. Für diese Rechnungen wurden die Programme RACETRACK [RA 91] und BETA [BE 88] verwendet.

Der Verlauf der Maschinenfunktionen in einem Achromaten bei der Optik ROSY A ist in Abb. 2.25 wiedergegeben. Der Verlauf der Maschinenfunktionen ist ähnlich wie bei ROSY I ( siehe Abb. 2.18 ), nur ist bei dieser Optik der Gradient im Ablenkmagneten so angepaßt, daß der Verlauf der  $\beta(y)$  -Funktion in den Ablenkmagneten des Bogens gleich ist.

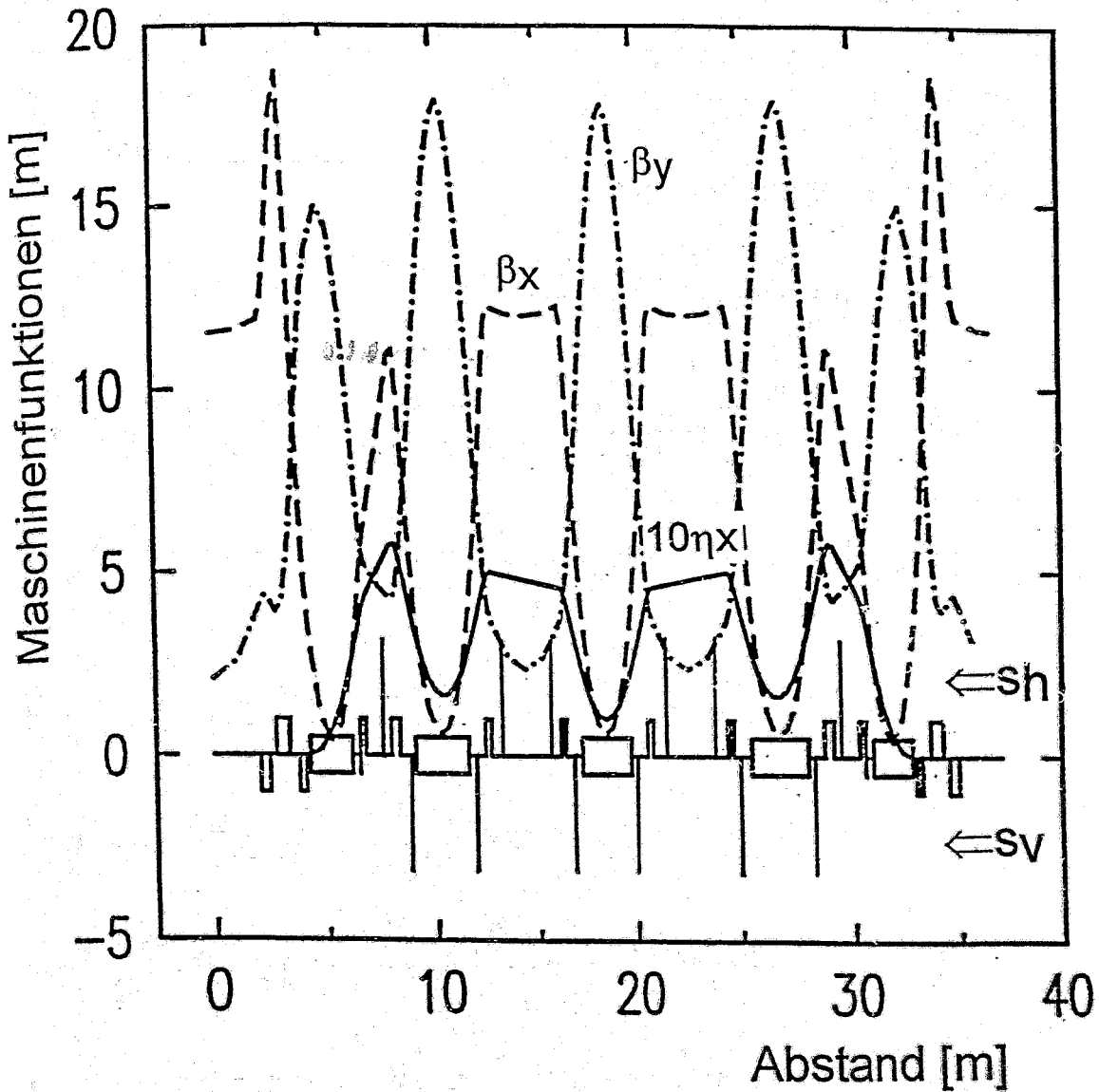


Abb. 2.25: Verlauf der Maschinenfunktionen in einem Achromaten bei der Optik ROSY A. Die möglichen Positionen der Sextupole  $S_H$  und  $S_V$  sind angegeben

Die optimale Position der Sextupole für die Chromatizitätskompensation ist an den Stellen, wo die Differenz zwischen der  $\beta(x)$ - und der  $\beta(y)$ -Funktion und auch die Dispersion am größten ist. Somit sollten die Sextupole für die Kompensation der Chromatizität in y-Richtung unmittelbar an den Enden der Ablenkmagnete und die für die x-Richtung in der Nähe der Quadrupole positioniert werden. Die möglichen Positionen der Sextupole sind in Abb. 2.25 dargestellt.

Zur Bestimmung der maximalen dynamischen Apertur, wurden die Sextupole an den verschiedenen Positionen unterschiedlich erregt und die dynamische Apertur bestimmt. Um dieses Verfahren zu vereinfachen, wurde die Anzahl der Sextupole an den verschiedenen Positionen verändert. Die untersuchten Sextupolanordnungen sind in Abb. 2.26 aufgelistet, die mit RACETRACK berechneten dynamischen Aperturen sind in den Abb. 2.27 bis 2.29 dargestellt. Hierbei ist berücksichtigt, daß sich in den langen geraden Stücken Wiggler befinden. Das optimale Verhalten bezüglich der dynamischen Apertur ergibt sich für die Sextupolanordnung 1.

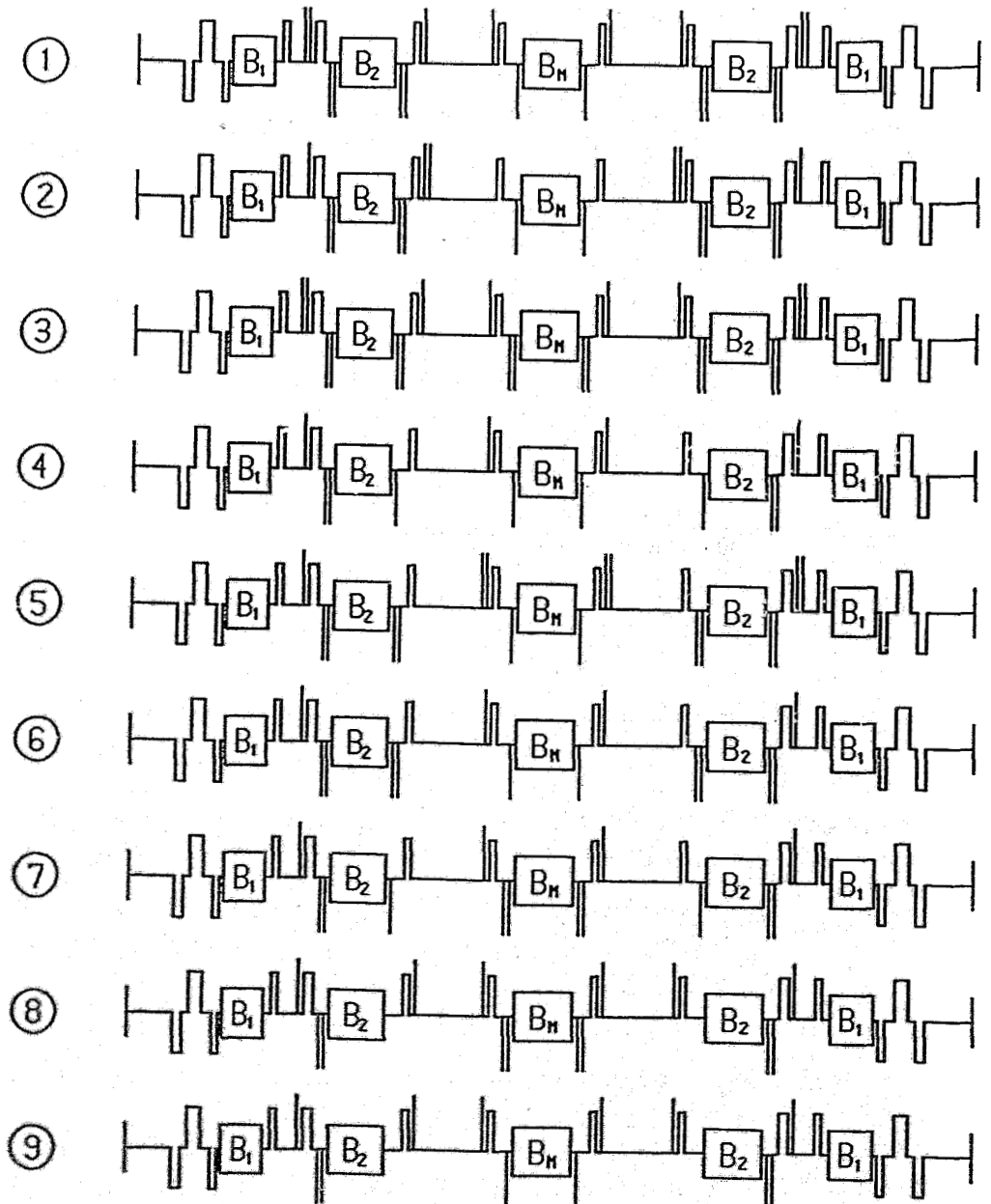


Abb. 2.26: Sextupolanordnungen, für die das magnetoptische Verhalten des Speicherringes ROSY untersucht wurde.

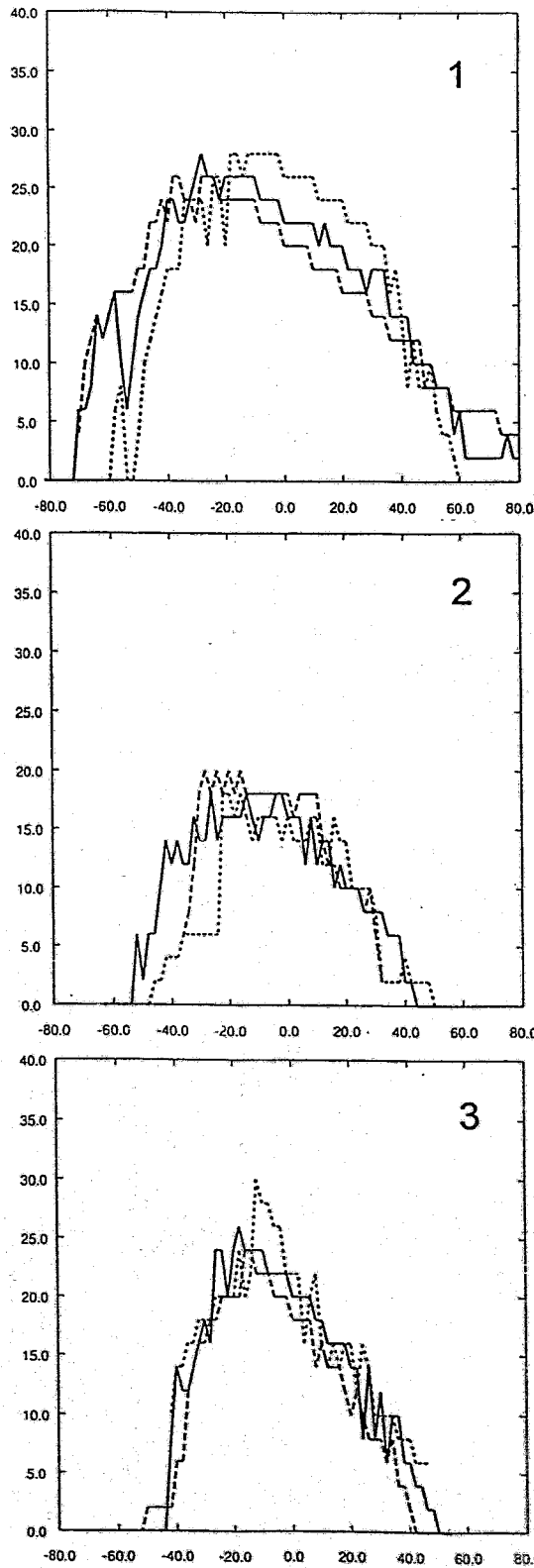


Abb. 2.27: Dynamische Aperturen für die Sextupolanordnungen 1, 2 und 3 der Abb.2.26. Die Rechnungen wurden durchgeführt für die Energieabweichungen von 0 , + 2% und - 2%.

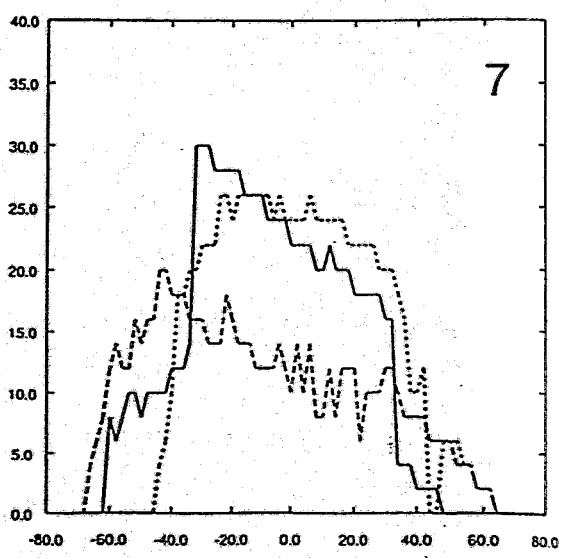
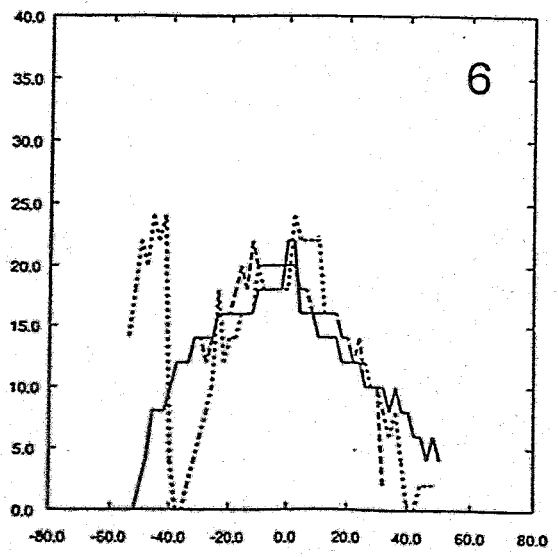
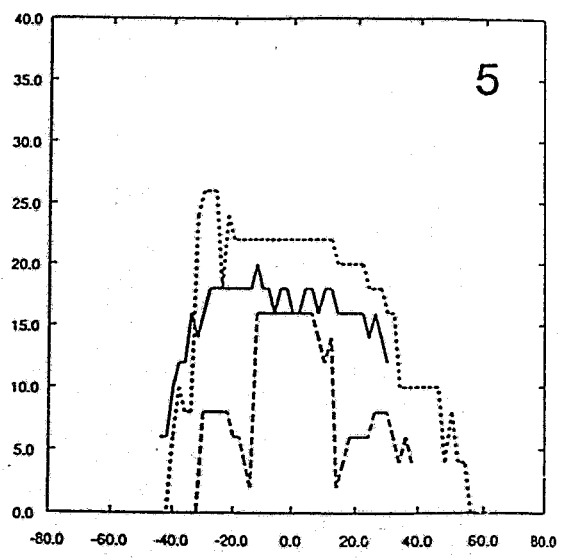
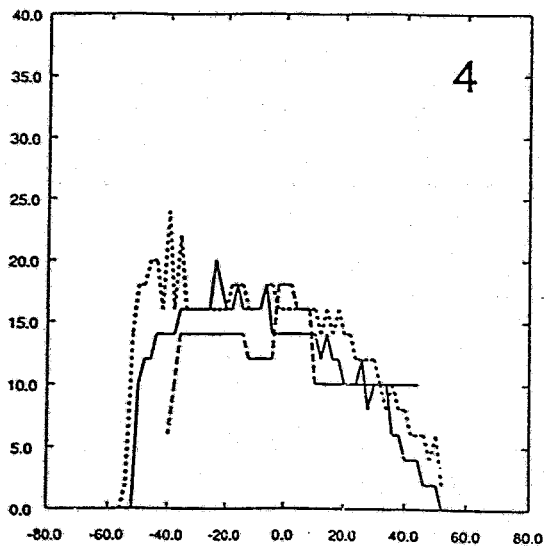


Abb. 2.28: Dynamische Aperturen für die Sextupolanordnungen 4, 5, 6 und 7 der Abb.2.26. Die Rechnungen wurden durchgeführt für die Energieabweichungen von 0, +2% und -2% .

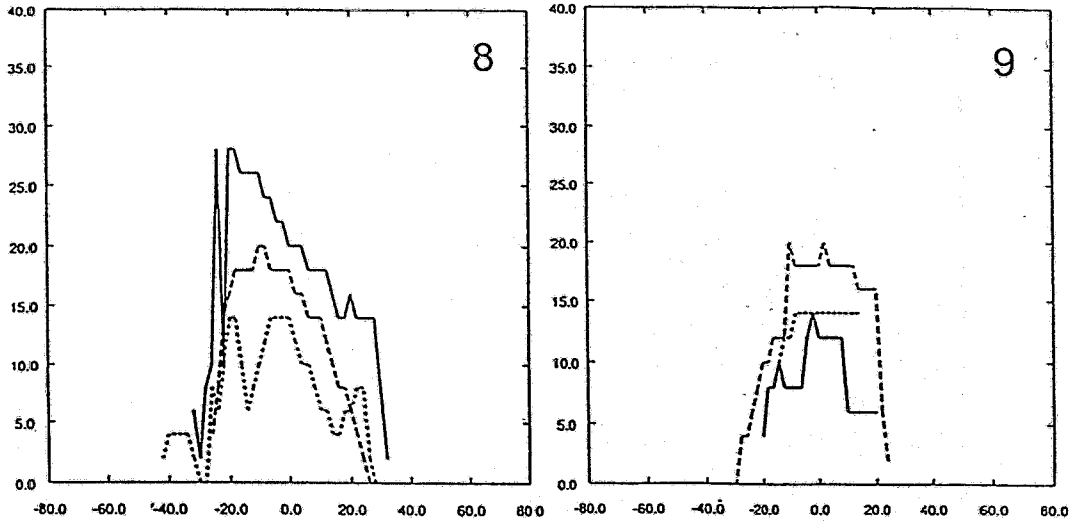


Abb. 2.29: Dynamische Aperturen für die Sextupolanordnungen 8 und 9 der Abb.2.26. Die Rechnungen wurden durchgeführt für die Energieabweichungen von 0 , + 2% und - 2% .

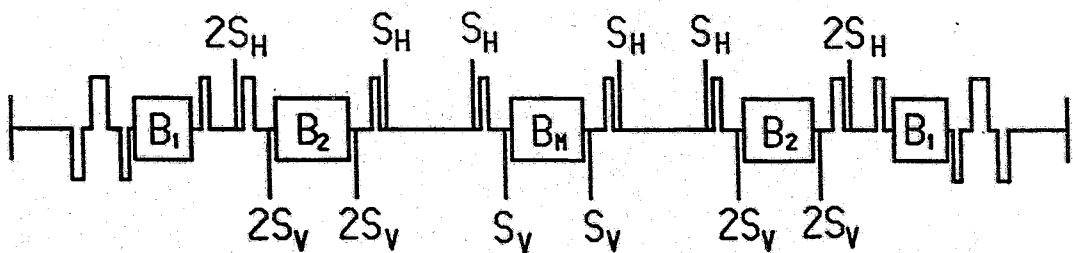
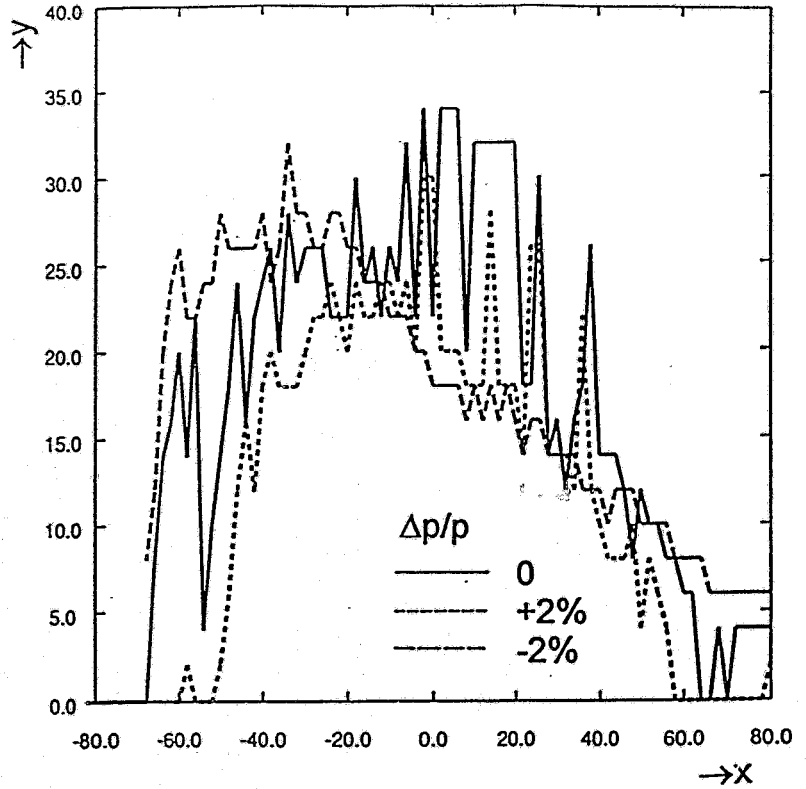


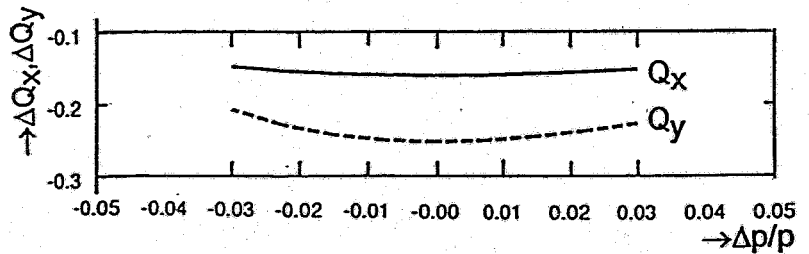
Abb. 2.30: Für den Speicherring ROSY gewählte Sextupolanordnung.

Das magnetoptische Verhalten des Speicherringes ROSY bei dieser Sextupolanordnung ist in der Abb. 2.31 mit der dynamischen Apertur sowie der Abhängigkeit des Arbeitspunktes von der Energie und der Amplitude dargestellt.

## Dynamic Aperture



## Energy Dependence of Tune



## Tune Shift with Amplitude

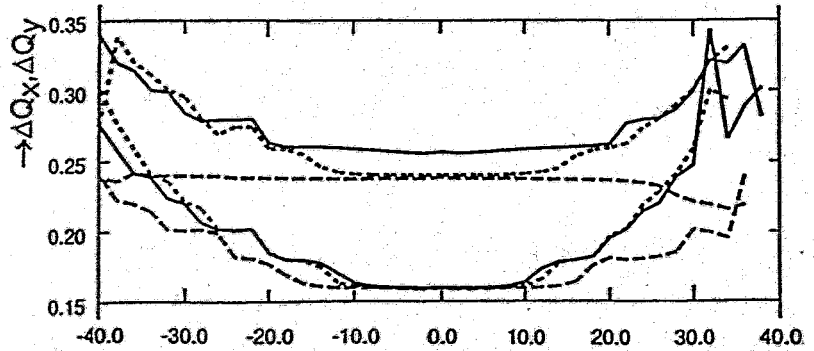
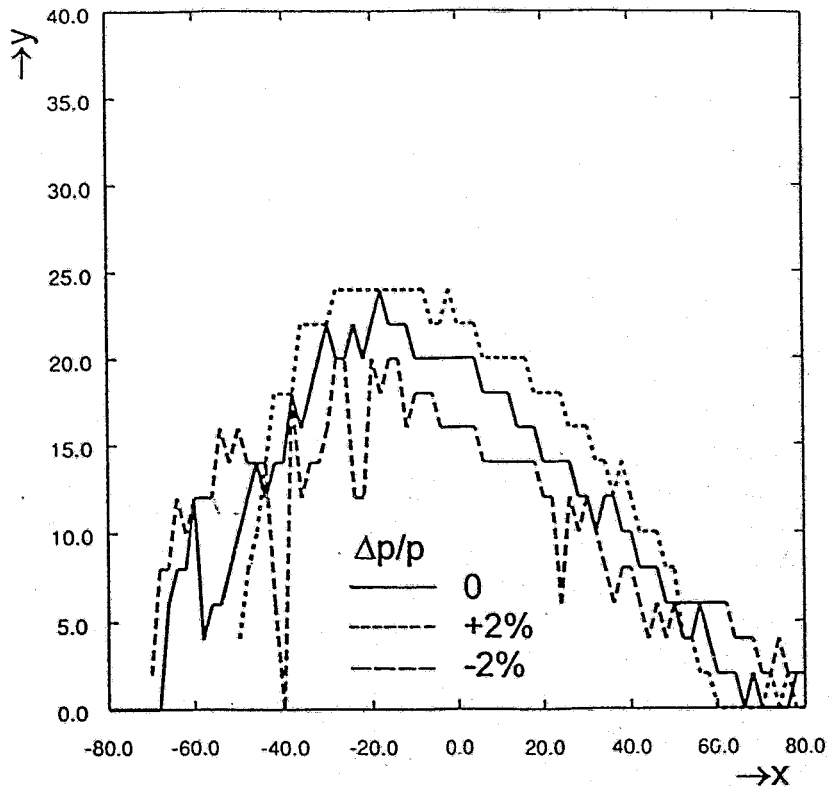


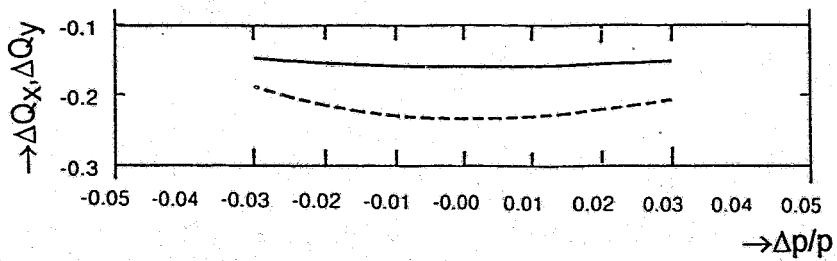
Abb. 2.31: Die dynamische Apertur sowie die Arbeitspunktvariation mit der Energie und der Amplitude bei der für ROSY gewählten Sextupoleinstellung (siehe Abb. 2.30).



## Dynamic Aperture



## Energy Dependence of Tune



## Tune Shift with Amplitude

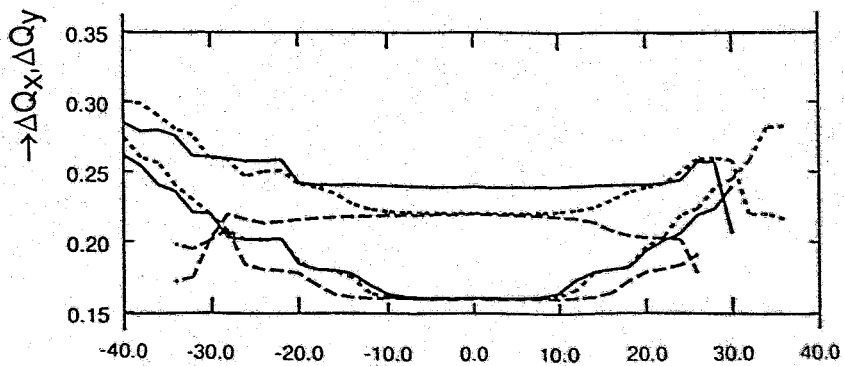


Abb. 2.32: Dynamische Apertur sowie Arbeitspunktvariation mit der Energie und der Amplitude bei der für ROSY gewählten Sextupoleinstellung unter Berücksichtigung von Undulatoren und Wiggeln

Die Ergebnisse unter Berücksichtigung des Einbaues von Wigglern und Undulatoren sind in Abb. 2.32 wiedergegeben. Der Vergleich der Abb. 2.31 und Abb. 2.32 zeigt, daß der Einbau der Insertion Devices die dynamische Apertur nur unwesentlich einschränkt. Die mit dem Code BETA berechneten Abhängigkeiten sind in guter Übereinstimmung mit den hier wiedergegebenen Werten des Programmes RACETRACK.

#### 2.4.2 Dynamische Apertur unter Berücksichtigung der Multipolfehler

Der Ablenkmagnet für ROSY ist entsprechend dem der Synchrotronstrahlungsquelle ELETTRA (siehe Kap. 6) aufgebaut. Geändert wurde nur die Gaphöhe zur Verminderung des Leistungsverbrauches und das Polprofil, um den gewünschten Gradienten zu erreichen. Hier muß aber festgestellt werden, daß der Gradient von ROSY etwa dem des ELETTRA-Ablenkmagneten entspricht. Die Multipolkomponenten, die somit beim Ablenkmagneten von ROSY auftreten können, sind in der gleichen Größenordnung wie bei ELETTRA und somit können die an diesem gemessenen Multipole auch auf den Ablenkmagneten von ROSY angewandt werden. Die Meßergebnisse des ALS-Ablenkmagneten sind nicht zu übernehmen, da dieser einen wesentlich größeren Gradienten hat.

Entsprechend den bei ELETTRA ermittelten höheren Harmonischen [To 93], [Za 93], [Ia 93] wurden für die Ablenkmagneten von ROSY die in Tabelle 2.3 wiedergegebenen  $B_n$  L-Werte ermittelt [RA 93] und zwar entsprechend folgender Umrechnungsformel:

$$A_n(ROSY) = A_n(ELETTRA) \frac{B_{ELETTRA} \Delta\phi_{ROSY}}{B_{ROSY} \Delta\phi_{ELETTRA}}$$

Der am ELETTRA gemessene Verlauf des Fehlers in der magnetischen Flußdichte durch die höheren Harmonischen oberhalb der Oktupolkomponente ist in Abb. 2.33 dargestellt.

Aufgrund der magnetischen Vermessung der Quadrupole der Synchrotronstrahlungsquellen ALS, ESRF und ELETTRA liegt ein umfangreiches Datenmaterial bezüglich der Multipolfehler der Quadrupole vor [Ta 93], [Za 93], [Ro 90b] und [Li 92]. Die detailliertesten Ergebnisse liegen von der ALS vor und diese Werte wurden für die Berechnung des Einflusses der Multipolfehler in den Quadrupolen auf die dynamische Apertur herangezogen.

Tabelle 2.3: Aus den Meßergebnissen der ELETTRA-Ablenkmagnete ermittelten höheren Harmonischen ( $B_n L$ -Werte) zur Berechnung der dynamischen Apertur.

n	$B_n L$ [15-Grad-Magnet]			$B_n L$ [20-Grad-Magnet]		
3	-6,5	$10^{-2}$	$m^{-2}$	-8,6	$10^{-2}$	$m^{-2}$
4	-1,3	$10^{-1}$	$m^{-3}$	-1,73	$10^{-1}$	$m^{-3}$
5	+0,686	$10^{+2}$	$m^{-4}$	+9,15	$10^{+1}$	$m^{-4}$
6	+3,633	$10^{+2}$	$m^{-5}$	+9,996	$10^{+2}$	$m^{-5}$
7	-0,912	$10^{+5}$	$m^{-6}$	-1,216	$10^{+5}$	$m^{-6}$
8	-3,274	$10^{+5}$	$m^{-7}$	-4,363	$10^{+5}$	$m^{-7}$
9	-6,977	$10^{+4}$	$m^{-8}$	-1,707	$10^{+5}$	$m^{-8}$
10	-0,926	$10^{+8}$	$m^{-9}$	-1,235	$10^{+8}$	$m^{-9}$

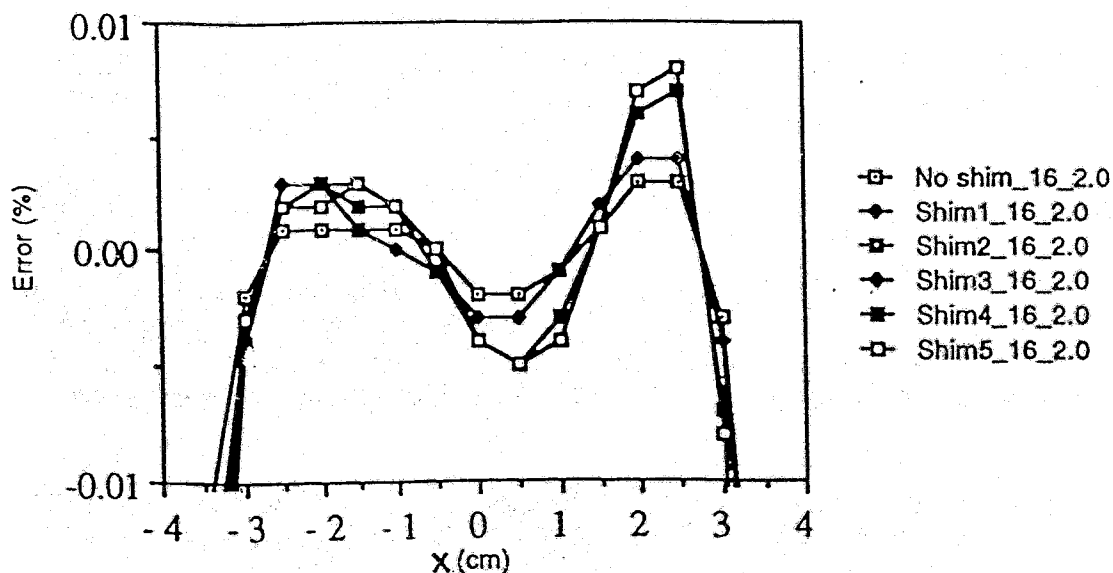


Abb.2.33: Der durch die höheren Harmonischen (oberhalb der Oktupolkomponente) gemessene Fehler beim ELETTRA-Ablenkmagneten [la 93]

Als Mittelwert der Messung wurde der Quadrupol SQF A22 bei einem Erregerstrom von  $I = 535,7$  Ampere genommen. Bei einem Radius  $r_0 = 30$  mm wurden die in Tabelle 2.4 wiedergegebenen Verhältnisse der höheren Harmonischen zu der Grundharmonischen gemessen:

Tabelle 2.4: Bei der ALS gemessenen Verhältnisse der höheren Harmonischen zur Grundharmonischen ( $B_n/B_2$ ) am Quadrupol SQF A22

n	3	4	5	6	7	8	9	10
$B_n/B_2$	2,133	1,074	-2,441	5,293	0,647	-2,877	0,239	2,74 $10^{-4}$

In Abb. 2.34 sind diese Verhältnisse graphisch dargestellt. Für die Programme BETA [BE 89] und RACETRACK [RA 93] müssen für die höheren Harmonischen die Werte  $A_n = B_n L$  eingegeben werden:

$$A_n = \frac{L}{\rho B} \frac{1}{(n-1)!} \frac{d^{n-1}B}{dx^{n-1}} \quad (2.5)$$

Mit der Beziehung:

$$\frac{1}{(n-1)!} \frac{d^{n-1}B}{dx^{n-1}} = \frac{G(B_n/B_2)}{x^{n-2}} \quad (2.6)$$

wobei G der Gradient des Quadrupoles ist, können die Werte  $A_n$  wie folgt aus dem Verhältnis  $B_n/B_2$  berechnet werden:

$$A_n = \frac{L}{\rho B} \frac{G(B_n/B_2)}{x^{n-2}} = B_n L \quad (2.7)$$

Mit den Werten für ROSY :  $\rho = 7,14771$  m,  $B_0 = 1,4$  T und  $L = 0,4$  m ergeben sich die in der Tabelle 2.5 zusammengefaßten Werte für  $A_n$ . In dieser Tabelle sind auch die Werte zum Vergleich aufgeführt, die sich aus den Magnetfeldmessungen der ESRF und der ELETTRA - Quadrupole ergeben.

Tabelle 2.5 : Zusammenstellung der Werte  $A_n$  der höheren Harmonischen von Quadrupolen für Rechnungen mit den Codes BETA und RACETRACK.

n	ALS	ELETTRA	ESRF
3	+4,84 $10^{-3}$	+4,57 $10^{-3}$	-6,40 $10^{-3}$
4	+8,12 $10^{-2}$	+4,31 $10^{-1}$	+1,75 $10^{-1}$
5	-6,15	+1,57	-2,18
6	+4,44 $10^{+2}$	+5,85 $10^{+2}$	+3,42 $10^{+2}$
7	+1,88 $10^{+3}$	+8,36 $10^{+2}$	-1,27 $10^{+2}$
8	-2,68 $10^{+5}$	+3,34 $10^{+4}$	-3,41 $10^{+3}$
9	+7,44 $10^{+5}$	+1,37 $10^{+6}$	-9,34 $10^{+4}$
10	+2,84 $10^{+8}$	-4,81 $10^{+8}$	-5,95 $10^{+7}$

Wie aus der Tabelle 2.5 zu entnehmen ist, gibt es zwischen den verschiedenen Quadrupolmessungen keine nennenswerten Abweichungen. Die  $A_n$ -Werte für Quadrupole anderer Längen sind durch eine Skalierung einfach berechenbar.

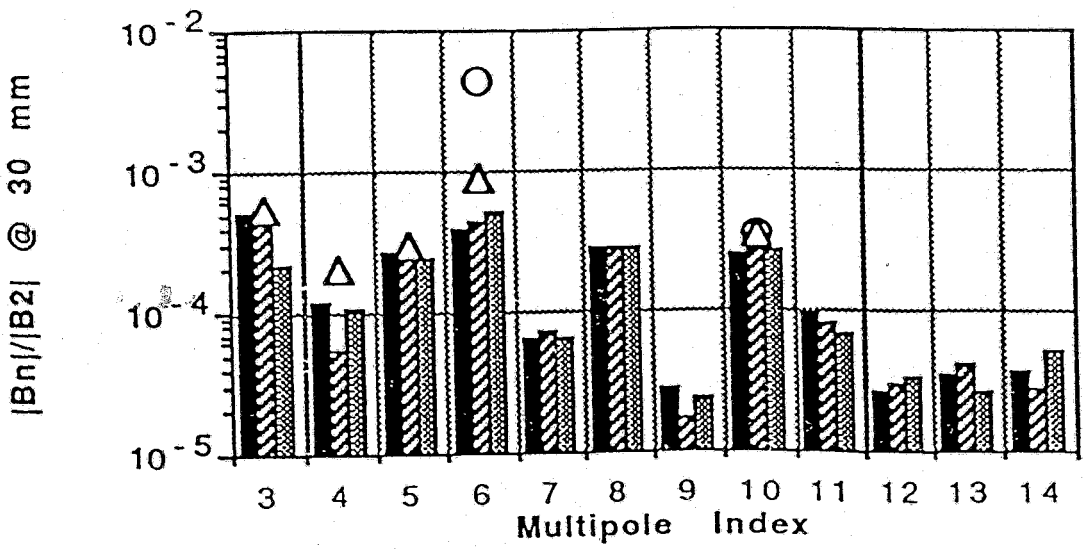


Abb.2.34: Die am ALS-Quadrupol SQFA22 gemessenen Verhältnisse der höheren Harmonischen zur Grundharmonischen.

Die dynamische Apertur unter Berücksichtigung der höheren Harmonischen in den Ablenkmagneten und den Quadrupolen (entsprechend den Tabellen 2.4 und 2.5, des Einbaues der Wiggler und Undulatoren, der Injektion und der Hochfrequenz - Cavities ist in Abb. 2.35 wiedergegeben. die Kurven wurden berechnet für die nominelle Energie und für Energieabweichungen von +/- 1 %.

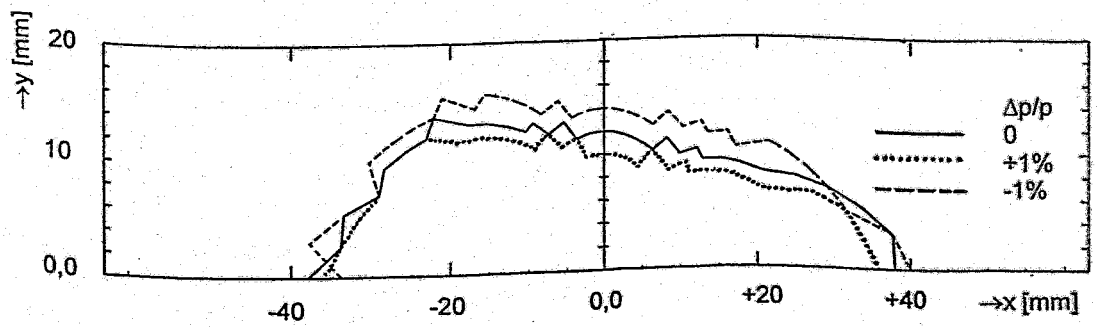


Abb. 2.35: Die dynamische Apertur des Speicherringes ROSY unter Berücksichtigung der höheren Harmonischen bis  $n = 10$ , der Wiggler und Undulatoren, der Injektion und der HF-Cavities.

Entsprechend Abb. 2.35 ergeben sich Aperturen von:

$$\begin{aligned} & - 34 \text{ mm} < x < 38 \text{ mm} \quad \text{und} \\ & - 12 \text{ mm} < y < 12 \text{ mm} \end{aligned}$$

oder auch ausgedrückt in Standardabweichungen des Strahlquerschnittes:

$$\begin{aligned} & - 62 \sigma_x < x < 69 \sigma_x \quad \text{und} \\ & - 162 \sigma_y < y < 162 \sigma_y \end{aligned}$$

Dies sind ausreichende Werte zur Erreichung einer langen Quantenlebensdauer und für die Durchführung eines effektiven Injektionsprozesses.

Zu vergleichen sind diese Werte mit den Rechnungen ohne Multipolfehler, die in Abb. 2.32 dargestellt sind. Ohne Berücksichtigung der Multipolfehler ergeben sich Aperturen von:

$$\begin{aligned} & - 60 \text{ mm} < x < 70 \text{ mm} \quad \text{und} \\ & - 20 \text{ mm} < y < 20 \text{ mm} \end{aligned}$$

Somit reduzieren sich die durch die Multipolfehler die dynamischen Aperturen um etwa den Faktor 2.

Mit der in Abb. 2.35 wiedergegebenen dynamischen Apertur, die für die Mitte des langen geraden Stückes berechnet wurde, ergeben sich die Akzeptanzen im Speicherring zu:

$$A_x(\text{dyna}) = 100 \pi \text{ mm mrad}$$

und

$$A_y(\text{dyna}) = 69 \pi \text{ mm mrad.}$$

Aufgrund der Abmessungen der Ablenkmagnete, Quadrupole und der Vakuumkammer ergeben sich die physikalischen Aperturen des Speicherringes ROSY zu:

$$A_x(\text{phys}) = 64 \pi \text{ mm mrad}$$

und

$$A_y(\text{phys}) = 20 \pi \text{ mm mrad}$$

Es ist ersichtlich, daß die dynamischen Aperturen in etwa um die Faktoren 1,5 ( $A_x$ ) bzw. 3,5 ( $A_y$ ) größer sind als die physikalischen.

In der Abb. 2.36 sind die berechneten dynamischen Aperturen dargestellt, nur unter Berücksichtigung der höheren Harmonischen a) der Ablenkmagneten und b) der Quadrupole.

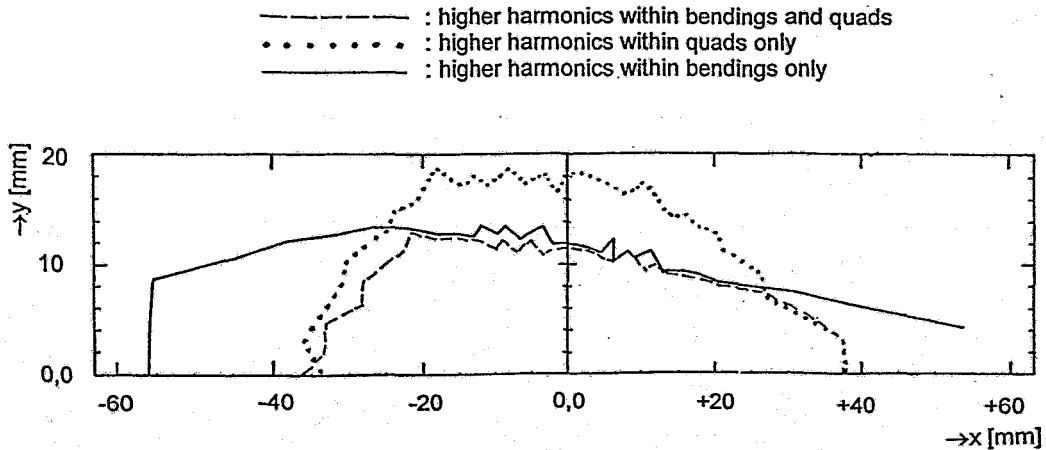


Abb. 2.36: Die dynamische Apertur des Speicherringes ROSY berechnet für:  
 a) unter Berücksichtigung aller Multipolfehler,  
 b) unter Berücksichtigung der Multipolfehler in den Ablenkmagn.  
 c) unter Berücksichtigung der Multipolfehler in den Quadrupolen.

Hieraus ergibt sich, daß die Einschränkung der dynamischen Apertur in der x - Richtung durch die höheren Harmonischen in den Quadrupolen und in der y - Richtung durch die in den Ablenkmagneten durchgeführt wird. Die Rechnungen haben weiter ergeben, daß bei den Quadrupolen der 20-polige Term ( $n = 10$ ) den größten Einfluß hat. Eine Reduzierung dieser Komponente um den Faktor 10 ergibt eine Vergrößerung der dynamischen Apertur in x - Richtung bis zu Werten von 45 - 50 mm.

## 2.5 Flexibilität der Magnetoptik des Speicherringes ROSY

Die Magnetoptik eines Speicherringes muß flexibel sein, um verschiedene Arbeitspunkte, oder bei auftretenden Fehlern in den Komponenten, den ursprünglichen Arbeitspunkt wieder einzustellen. Bei einem Speicherring wie ROSY, in dem Ablenkmagnete mit einem Gradienten verwendet werden und die auch zusätzlich noch gerampt werden, können Fehler im Verhältnis von Gradient zu Führungsfeld  $B_0$  auftreten. Damit ändert sich aber das magnetoptische Verhalten. Dieser Punkt ist im Kapitel 6 (Magnete) ausführlich behandelt worden. Es zeigt sich, daß für magnetische Flußdichten größer als 1,25 T der Ablenkmagnet Sättigungserscheinungen hat und sich der relative Gradient ändert. Die sich aus Abb.6.8, Kapitel 6, ergebenden Veränderungen des k - Wertes des Ablenkmagneten in Abhängigkeit von der Energie E oder der magnetischen Flußdichte  $B_0$  auf dem Sollorbit sind in Tabelle 2.6 dargestellt. Hierbei ist der Feldindex n.

Tabelle 2.6: Veränderung der Quadrupolstärke  $k$  im Ablenkmagneten während des Rampprozesses

$B_0$ [T]	$E$ [GeV]	$G/B$ [1/m]	$G$ [T/m]	$k$ [1/m <sup>2</sup> ]	$dK/K$ [%]	$n$
1,5	3,21430	1,94000	2,91000	0,27140	-3,78	13,866
1,41	3,02143	1,97609	2,78629	0,27650	-1,97	14,126
1,35	2,89290	1,99489	2,69310	0,27909	-1,06	14,259
1,27	2,72140	2,00831	2,55055	0,28097	-0,39	14,355
1,22	2,61429	2,01084	2,45322	0,28132	-0,26	14,373
0,98	2,10000	2,01619	1,97587	0,28207	0,0	14,411

Aus Tabelle 2.6 ist zu erkennen, daß sich aufgrund der Sättigung die Quadrupolstärke bis zu 3 % verändert. Mit zunehmender magnetischer Flußdichte nimmt die Quadrupolstärke ab. Mit dieser Abnahme ist aber auch eine Veränderung des Arbeitspunktes in  $y$ -Richtung verbunden. Die Kompensation dieser  $Q_y$ -Verschiebung ist nur möglich durch Veränderung des Verlaufes der  $\beta_y$ -Funktion im langen geraden Stück. Bei einer Wanderung des Feldindexes von  $n=14,41$  auf  $n=14,32$  muß zum Beispiel die  $\beta_y$ -Funktion in der Mitte des geraden langen Stückes von 2,10 auf 1,872 m/rad verkleinert werden, um den Arbeitspunkt zu erhalten. Diese Magnetoptik soll im folgenden mit ROSY B bezeichnet werden. Die Veränderung des Feldindexes auf  $n=14,16$  hat eine Verkleinerung der  $\beta_y$ -Funktion auf 1,6 m/rad zur Folge, um zum selben Arbeitspunkt zu kommen (Optik ROSY C). Die Anpassung der  $\beta_y$ -Funktion an den gewünschten Wert geschieht durch Veränderung der Quadrupolstärken im Triplett-System der Anpassungszelle. Der Verlauf der Maschinenfunktionen  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  und  $\eta_x$  für die Optiken ROSY B und ROSY C ist in Abb. 2.37 wiedergegeben.

Die dynamische Apertur der Optiken ROSY B und ROSY C, sowie die Veränderung der Arbeitspunkte mit der Energie und der Amplitude sind in den Abbn. 2.37 und 2.38 dargestellt. In beiden Fällen ist eine ausreichende dynamische Apertur vorhanden und der Verlauf des Tuneshifts sowohl mit der Energie als auch der Amplitude sind zufriedenstellend. Hiermit ist gezeigt, daß die Magnetoptik flexibel genug ist, um den Rampprozess effektiv und ohne Strahlverlust durchzuführen. Beim Rampprozess wird jedoch davon ausgegangen, daß die Gaphöhen der Wiggler und Undulatoren auf maximale Werte eingestellt sind (offen). Siehe hierzu auch den Abschnitt 4.



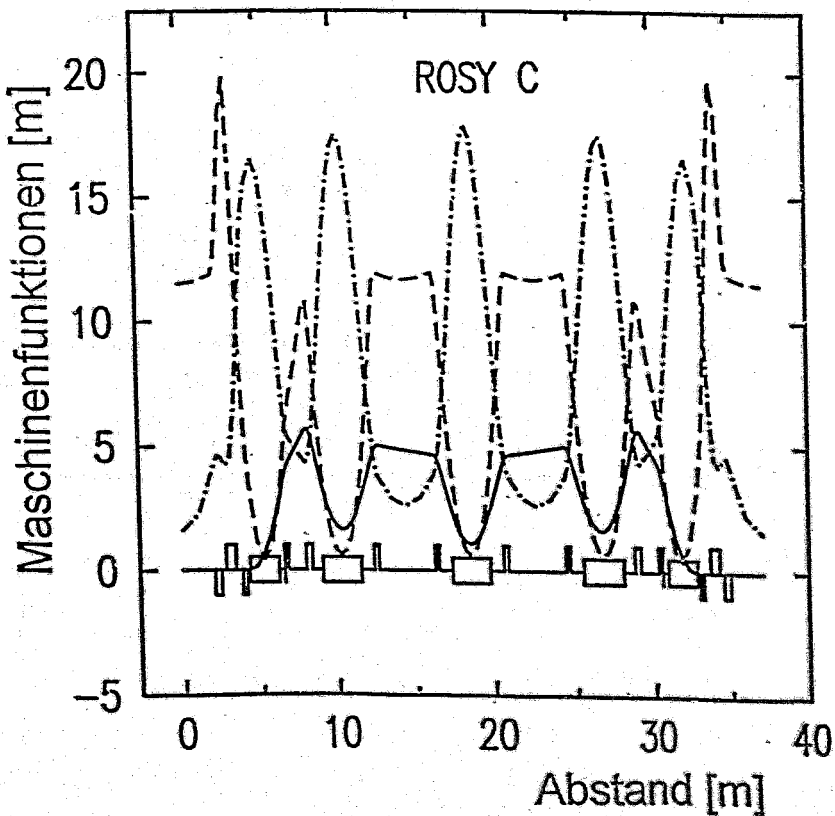
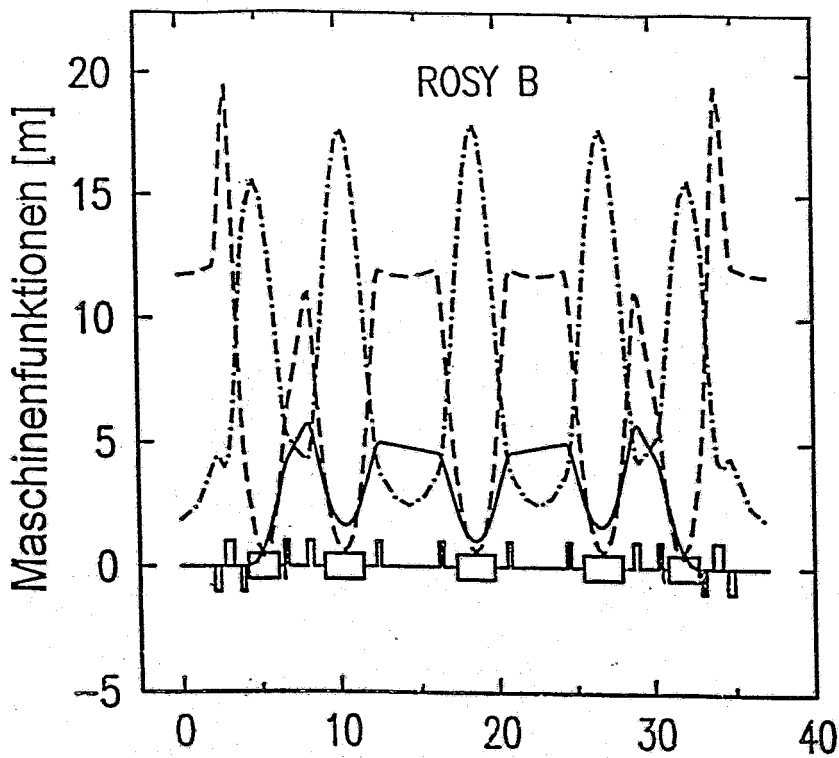


Abb. 2.37: Verlauf der Maschinenfunktionen  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  und  $\eta_x$  für die Feldindizes  $n=14,32$  (ROSY B) und  $n=14,16$  (ROSY C) unter Beibehaltung des Arbeitspunktes von ROSY A.

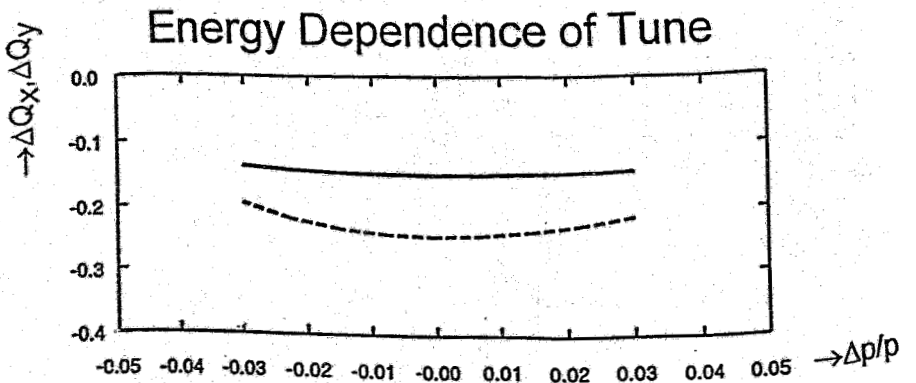
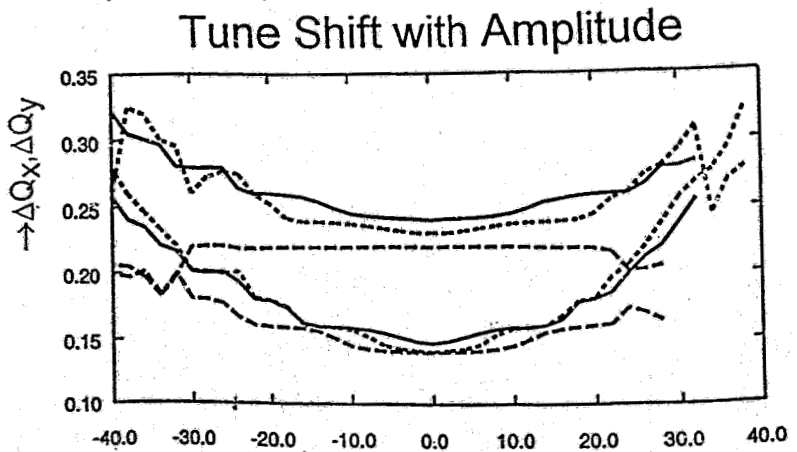
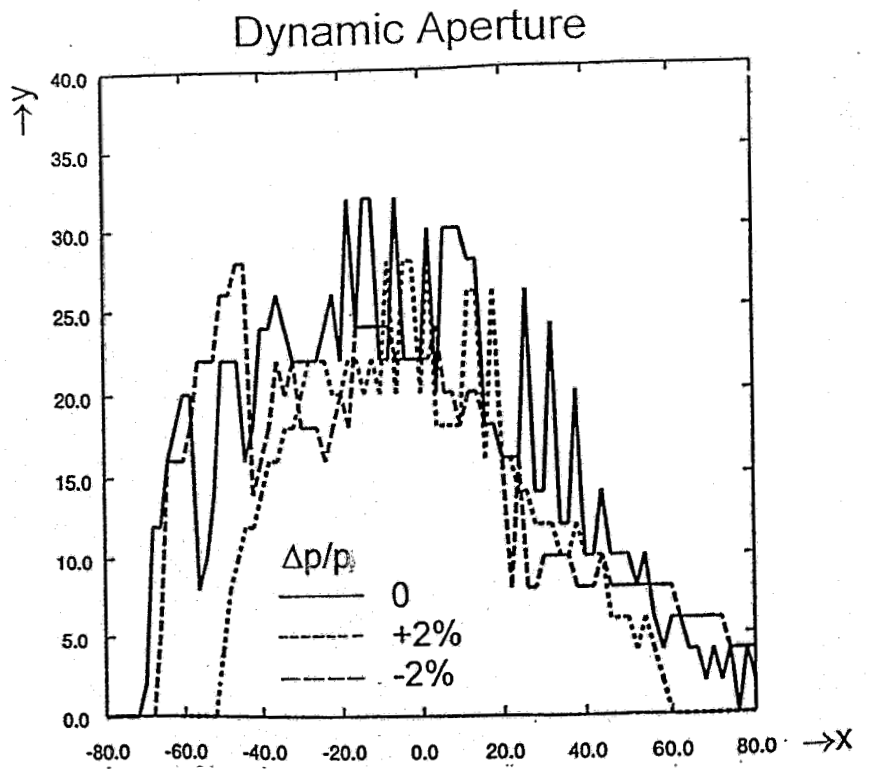


Abb. 2.38a: Die dynamische Apertur und die Verschiebung des Arbeitspunktes mit der Energie und der Amplitude der Betatronschwingungen für die Optik ROSY B. Bei der Optik ROSY B ist der Feldindex  $n=14,32$ . Die Optik führt jedoch zum selben Arbeitspunkt wie ROSY A.

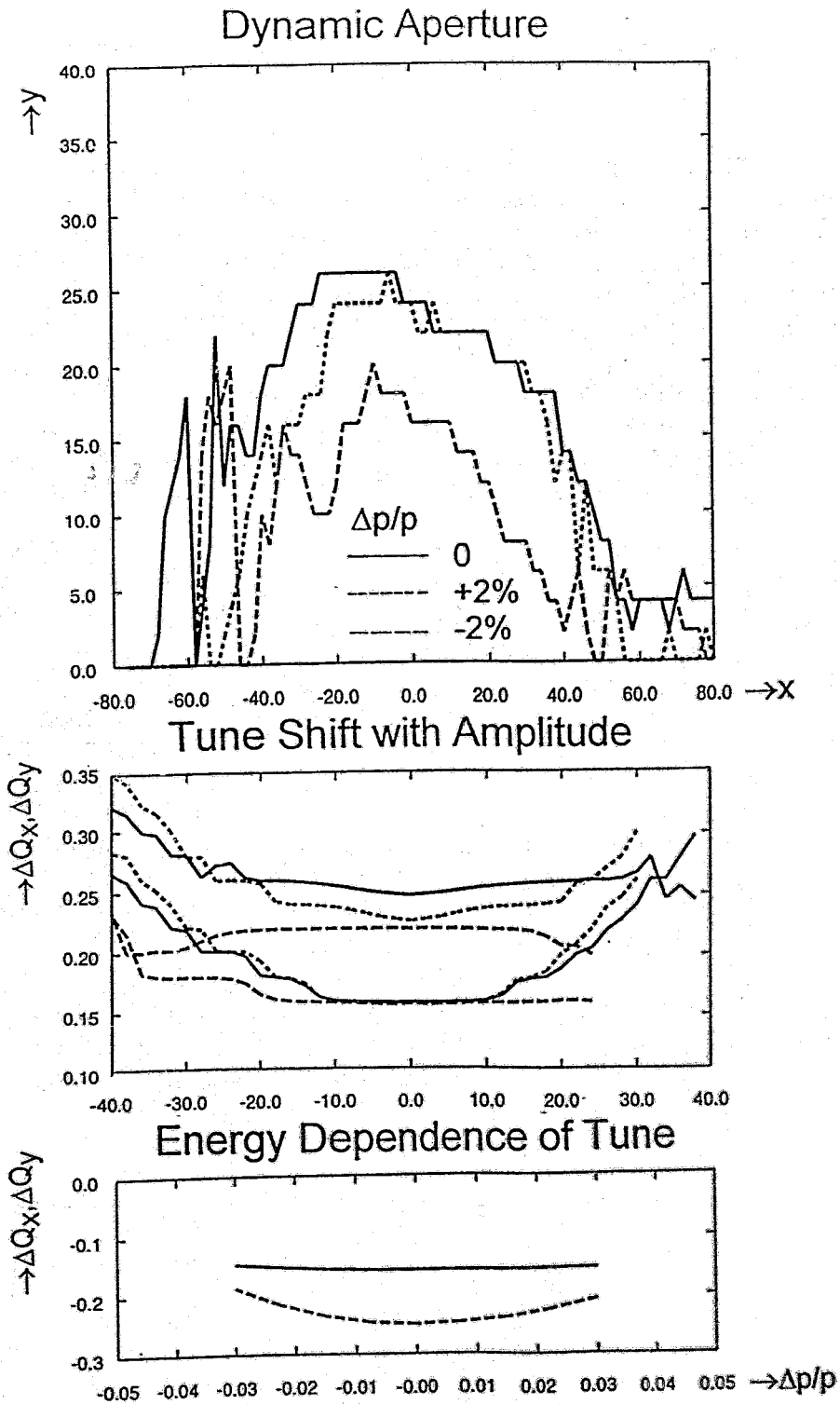


Abb. 2.38b: Die dynamische Apertur und die Verschiebung des Arbeitspunktes mit der Energie und der Amplitude der Betatronschwingungen für die Optik ROSY C. Bei der Optik ROSY C ist der Feldindex  $n=14,16$ . Die Optik führt jedoch zum selben Arbeitspunkt wie ROSY A

## 2.6 Aufstellgenauigkeit der Magnete und Position der Korrekturlemente

Bei den bisherigen Rechnungen wurde angenommen, daß die Magnete (Ablenkmagnete, Quadrupole und Sextupole) ideal aufgestellt sind, d.h. der Sollorbit auch wirklich durch die entsprechenden Symmetriepunkte der Elemente verläuft. In der Realität kann hiervon jedoch nicht ausgegangen werden; die Aufstellgenauigkeit aller Elemente im Ring liegt in der Größenordnung von einem zehntel Millimeter ( 0,1 mm ) und somit gilt zu untersuchen, welchen Einfluß diese Aufstellgenauigkeit auf das magnetoptische Verhalten des Speicherringes hat; insbesondere ob der Gradient in den Ablenkmagneten zu besonderen Problemen führt. Für diese Berechnungen wurde das Programm BETA [BE 89] herangezogen, da hier eine Fehlaufstellung der Elemente direkt eingegeben werden kann.

Für diese Untersuchungen wurde zuerst jedes Element im Ring einzeln in der x - und y - Richtung um 0,5 mm verstellt und es wurde der dazugehörige "closed orbit" berechnet. Hieraus ergibt sich erstens der sogenannte Verstärkungsfaktor der Maschine und es zeigt sich zweitens, welches Element besonders empfindlich gegenüber einer Fehlaufstellung ist. Bei diesen Rechnungen wurde nur eine Fehlaufstellung der Ablenkmagnete und der Quadrupole angenommen. In Abb. 2.39 sind die berechneten "closed orbits" wiedergegeben, die sich bei einer Fehlaufstellung des Elementes 6 und des Elementes 10 von jeweils 0,5 mm ergeben. Element 6 ist ein Quadrupol (siehe Abb. 2.40) und Element 10 der Ablenkmagnet. In beiden Fällen ergeben sich Abweichungen vom Sollorbit von etwa 40 mm und damit zeigt sich keine besondere Anforderung an die Aufstellgenauigkeit des Ablenkmagneten. Aus diesen Rechnungen ergibt sich der Verstärkungsfaktor der Maschine zu etwa 80. Während bei der Verstellung des Qudrupoles die Abweichungen vom Sollorbit in x - und y - Richtung von der gleichen Größenordnung sind, ergeben sich bei dem defokussierenden Ablenkmagneten größere Abweichungen in y - als in x - Richtung.

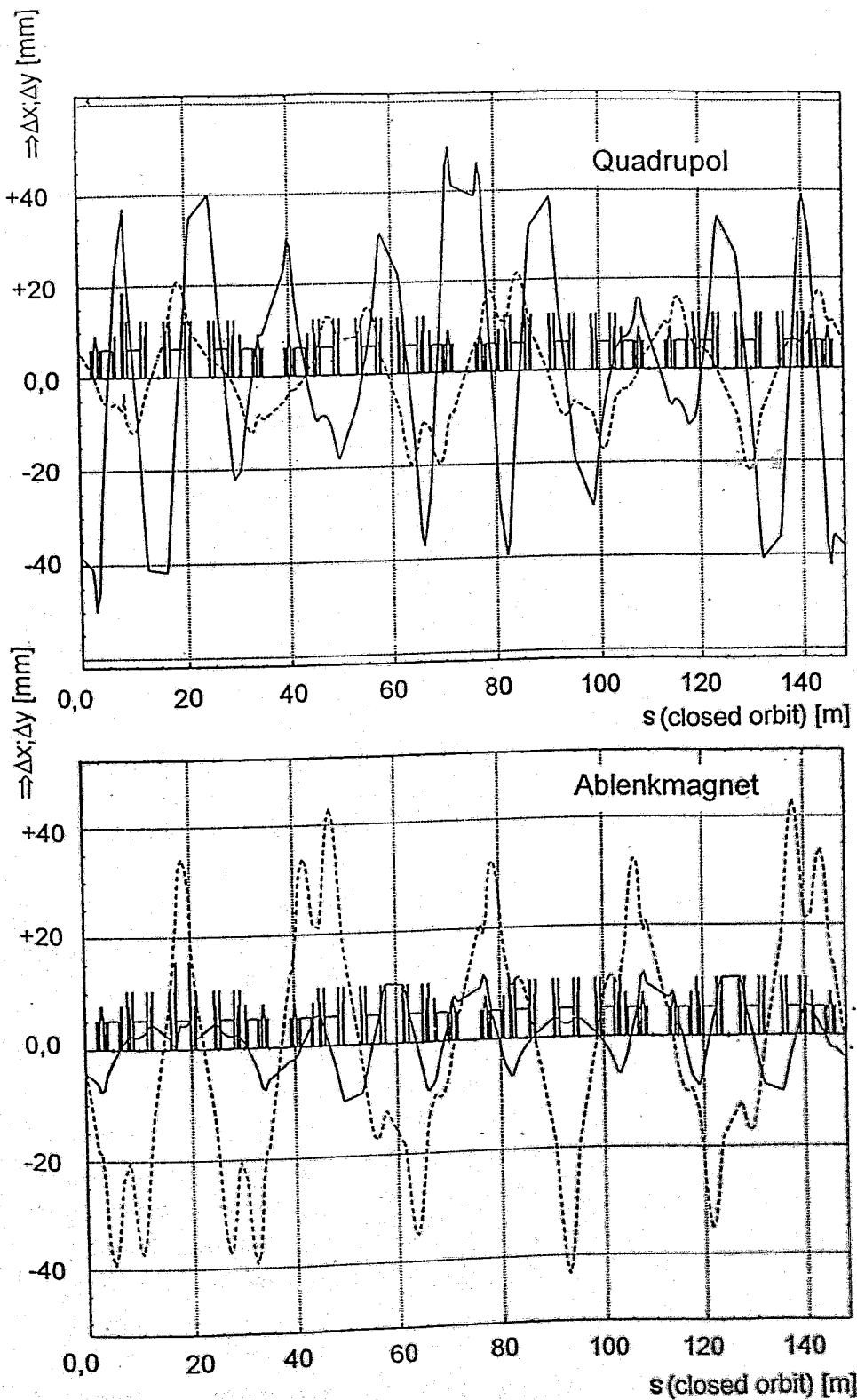


Abb. 2.39: Verschiebung des Sollorbits bei einer Fehlaufstellung der Elemente 6 (Quadrupole) und 10 (Ablenkmagnet) von jeweils 0,5 mm. Durchgezogenen Linie ist der Orbit in x - und gestrichelt in y - Richtung.

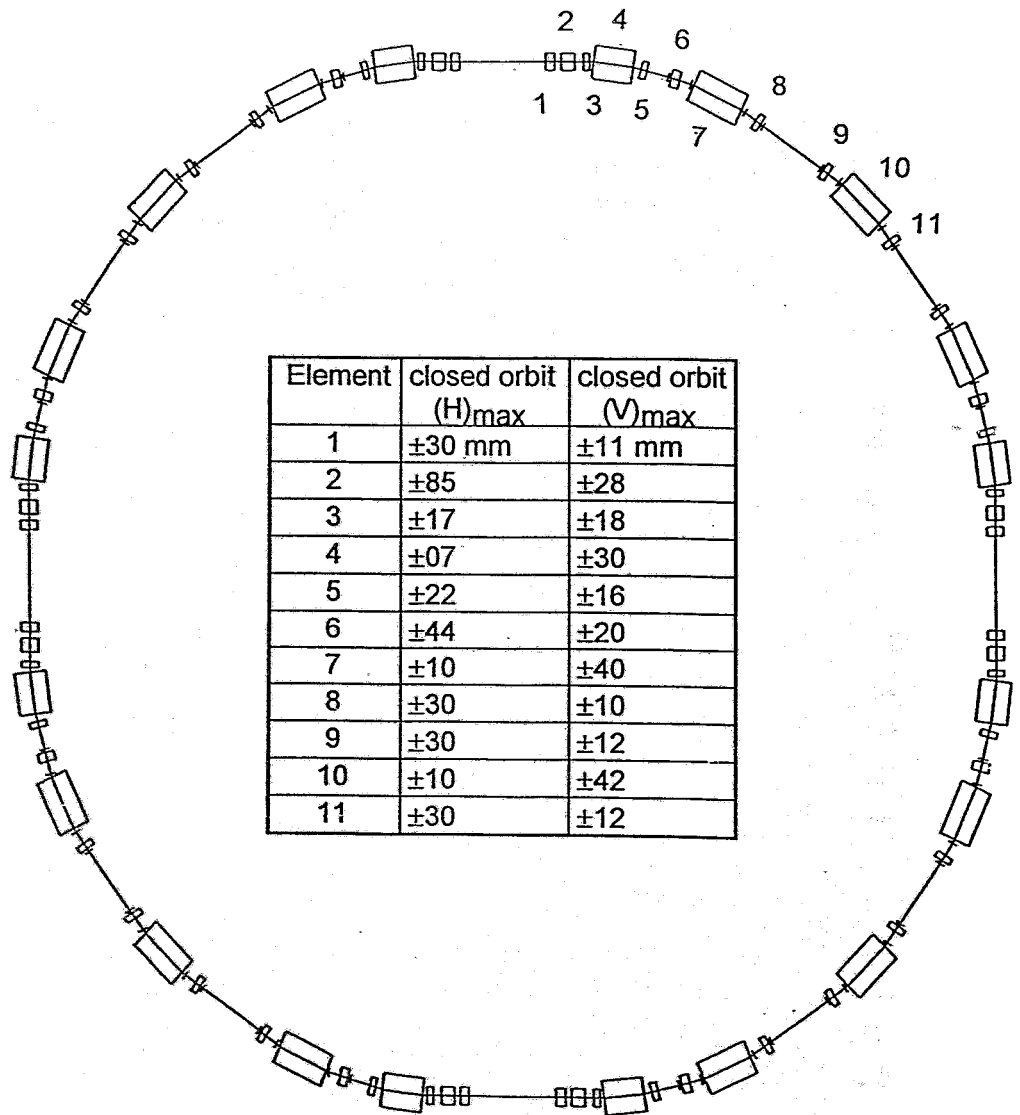


Abb. 2.40: Zusammenstellung der maximalen Sollorbitverschiebungen bei einer Fehlaufstellung der Elemente von 0,5 mm. c.o.(H)<sub>max</sub> und c.o.(V)<sub>max</sub> sind maximalen Orbitverschiebungen in x - und in y - Richtung.

Die Abweichungen vom Sollorbit bei einer Verstellung der einzelnen Elemente um jeweils 0,5 mm sind in Abb. 2.40 tabellarisch zusammengestellt. Der Einfluß der Fehlaufstellung des Elementes 6 auf die dynamische Apertur ist in Abb. 2.41 wiedergegeben. Nach Abb. 2.39 sind bei dieser Fehlaufstellung Abweichungen vom Sollorbit von maximal 40 mm vorhanden, was zu einer relativ kleinen Einschränkung der dynamischen Apertur führt (siehe Abb. 2.41).

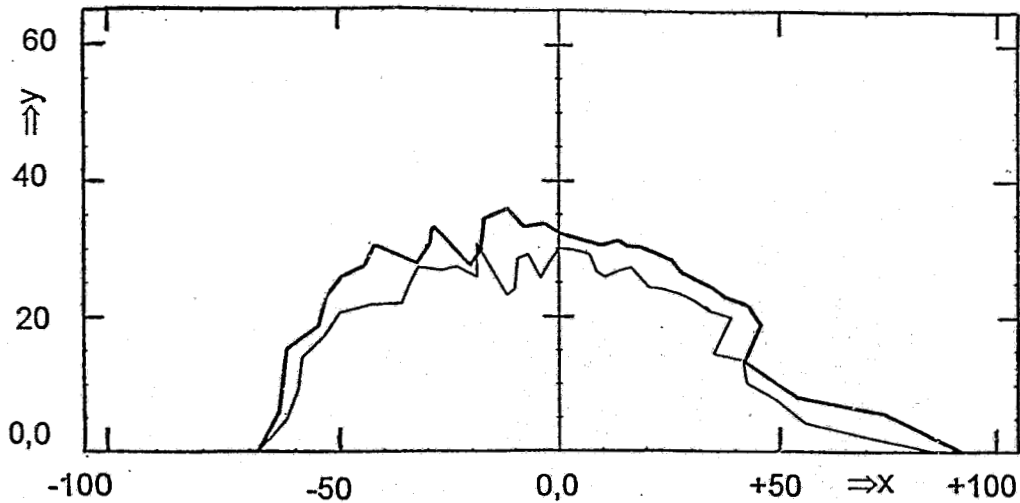


Abb. 2.41: Die dynamischen Aperturen des Speicherringes ROSY ohne (dicke Linie) und mit Fehlauflstellung des Elementes 6 von 0,5 mm (dünne Linie).

Die Berechnungen zu diesen Untersuchungen zeigen, daß es günstiger ist, mehrere Komponenten zu einem Block zusammenzufassen, wie es in Abb. 2.42 dargestellt ist. Die Abweichungen vom Sollorbit bei einer Fehlauflstellung der Blöcke um 0,5 mm ist in Abb. 2.42 ebenfalls tabellarisch aufgeführt. Der Vergleich der Abb. 2.42 mit Abb. 2.40 zeigt, daß sich der Verstärkungsfaktor der Maschine beim Zusammenfassen von Elementen zu Blöcken um den Faktor 4 (x - Richtung) bzw. um den Faktor 2 (y - Richtung) vermindert. Dies ergibt sich auch aus den Verschiebungen des Sollorbits entsprechend den Abb. 2.39 und 2.43.

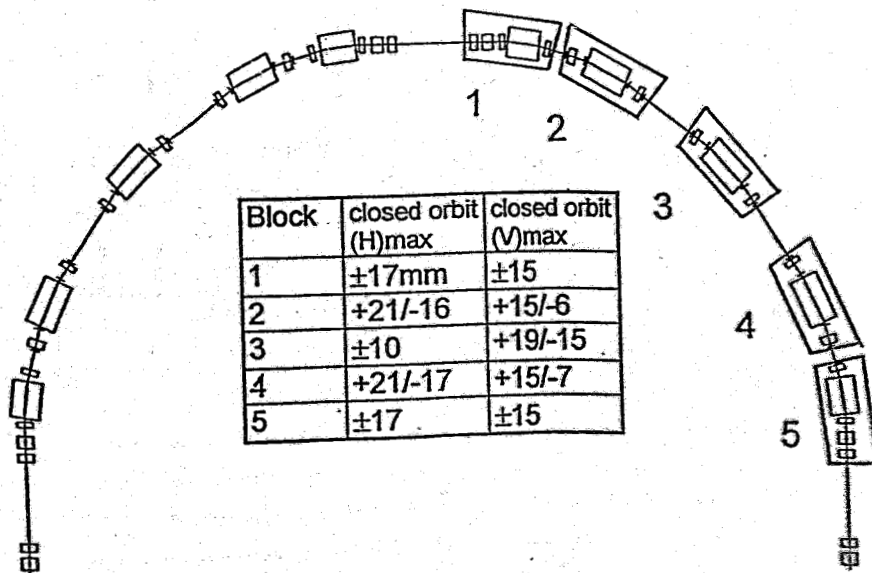


Abb. 2.42: Zusammenstellung der maximalen Sollorbitverschiebungen bei einer Fehlauflstellung der Blöcke von 0.5 mm. c.o.(H)max und c.o.(V)max sind maximalen Orbitverschiebungen in x - und in y - Richtung.

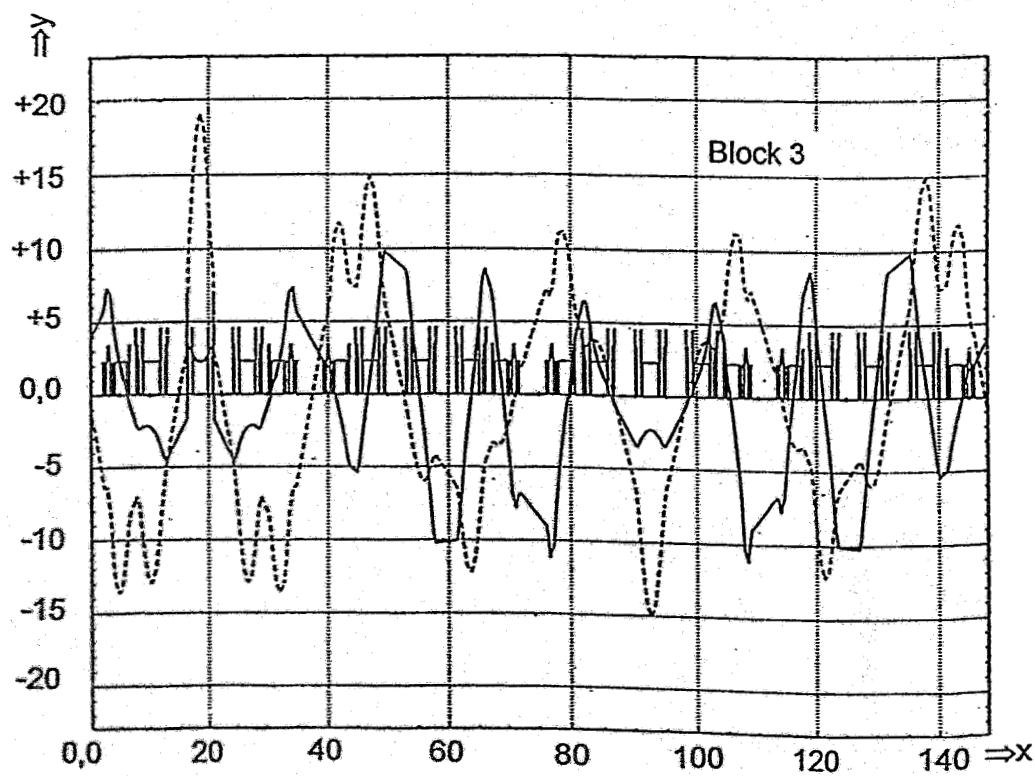
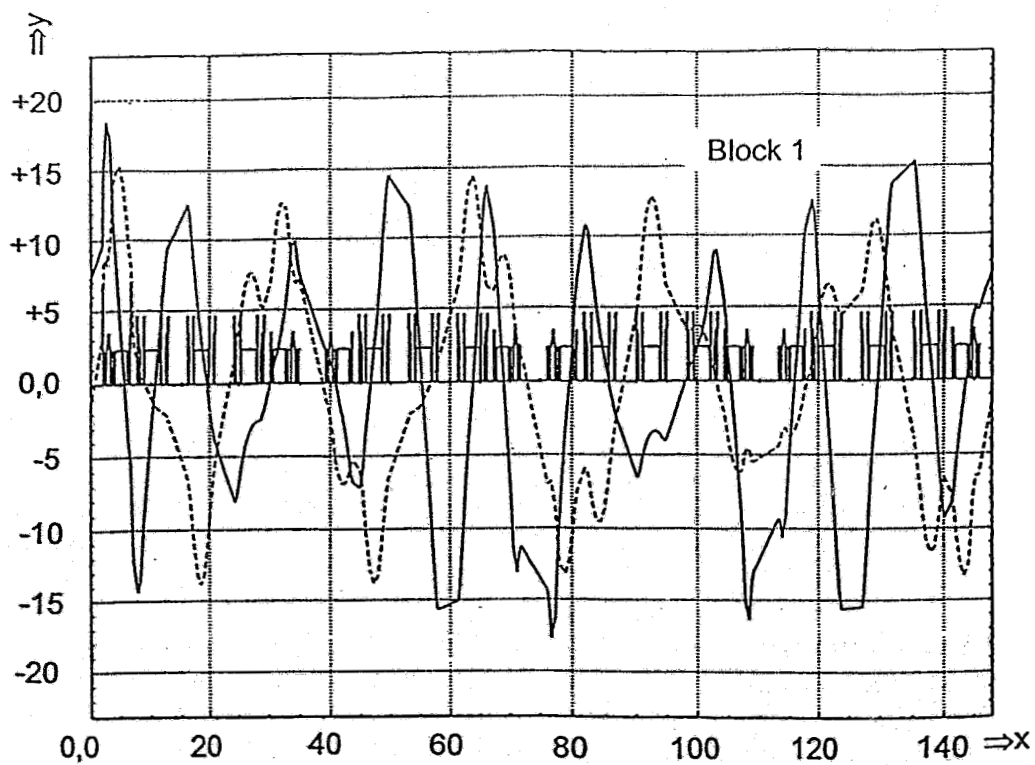


Abb. 2.43: Veränderungen des Sollorbits bei einer Fehlaufstellung der Blöcke 1 und 3 um 0,5 mm. Horizontal : durchgezogene - und vertikal: gestrichelte Linie ( vergleiche mit Abb. 2.40 ).



Die dynamische Apertur für vier verschiedene Häufigkeitsverteilungen der Fehlauflagenstellungen und beim Einbau von Wigglern und Undulatoren ist in den Abb. 2.44 a und Abb 2.44 b dargestellt. Die Verminderung in x - Richtung ist relativ klein, jedoch in y - Richtung liegt sie in der Größenordnung von 30 - 40%. Diese Einschränkung lässt sich vermeiden, wenn der "closed orbit" durch Korrekturmagnete korrigiert wird.

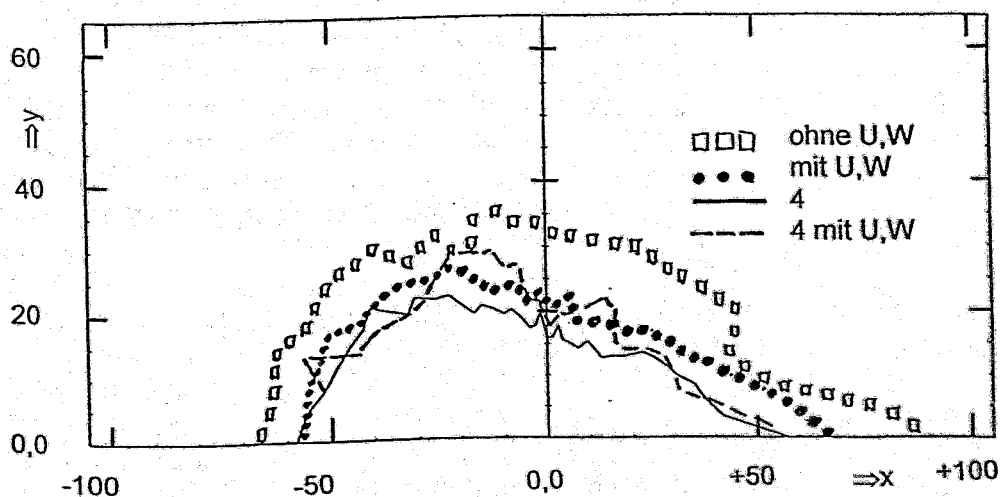
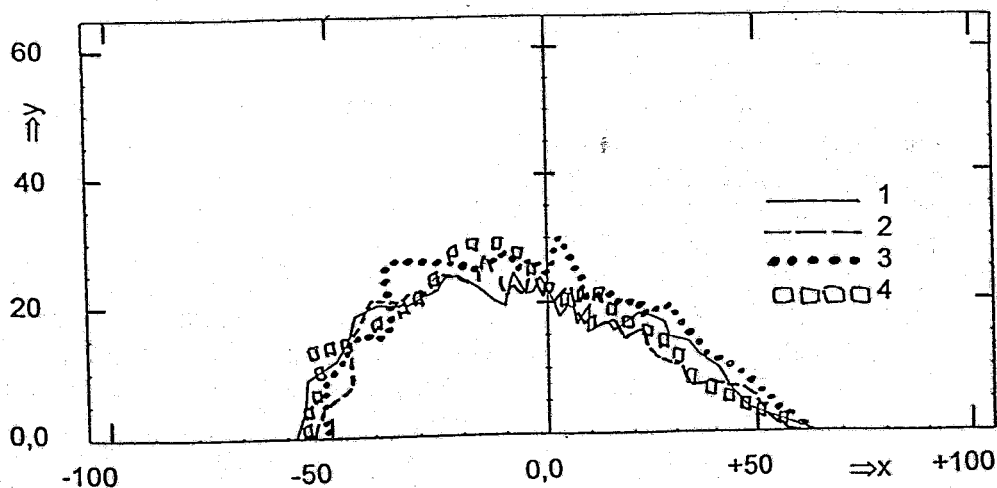


Abb. 2.44: Die dynamische Apertur des Speicherringes ROSY bei verschiedenen Fehlauflagenstellungen ( 4 Verteilungen) sowie unter Einbeziehung von Undulatoren und Wiggler.

Der Einbau der Korrekturmagnete ist nicht unbedingt notwendig wegen der Einschränkung der dynamischen Apertur, sondern wegen der Korrektur der Sollorbitabweichungen. Der Querschnitt des gespeicherten Elektronenstrahles liegt in der Größenordnung von etwa 0,2 mm. Dieser Querschnitt wird bei einer Synchrotronstrahlungsquelle über ein optisches System auf eine Probe abgebildet. Wandert die Position des Elektronenstrahles in der gleichen Größenordnung wie der Querschnitt, so kann es zu erheblichen Intensitätsproblemen bei den angeschlossenen Experimenten kommen. Der Einbau der Korrektur Elemente ist somit in erster Linie für die Korrektur des Orbits gedacht. Wenn dieser allerdings optimal korrigiert ist, dann sind die Einschränkungen in der dynamischen Apertur auch vernachlässigbar.

Für die Korrektur des "closed orbits" werden in den Beschleuniger Korrekturmagnete (Steerer) eingebaut, die es erlauben, die Richtung des Strahles in gewissen Grenzen zu verändern. Die Anzahl der zu verwendenden Korrektur Elemente hängt sehr stark von den Betatronschwingungen ab, die der Strahl vollführt. Eine mittlere Größe zur Beschreibung dieser Schwingungen ist der Arbeitspunkt, der die Anzahl der Schwingungen pro Umlauf wiedergibt. Bei Maschinen der 3. Generation sollten pro Schwingung mindestens 4 Korrektur Elemente vorhanden sein. Bei ROSY, mit den Arbeitspunkten  $Q_x \sim 9$  und  $Q_y \sim 5$  werden somit insgesamt 36 Korrektur Elemente für die horizontale und 20 für die vertikale Richtung benötigt; oder pro Achromat 9 bzw 5. Die Abweichungen vom Sollorbit werden über die Positionsmonitore (PIM) gemessen (siehe Abb. 2.45). Insgesamt sollen in den Speicherring 40 Positionsmonitore eingebaut werden.

Die Rechnungen (durchgeführt mit dem Programm RACETRACK) zeigen, daß bei der Verwendung von 40 Steerern in der horizontalen und 32 in der vertikalen Richtung, bei einer Fehlauflistung der Magnete von 0,2 mm, nach der Korrektur closed-orbit - Abweichungen in der Größenordnung von 0,3 mm übrigbleiben. Hierbei werden die Abweichungen vom Sollorbit über die Positionsmonitore ermittelt und die Stärken der Steerer solange geändert, bis die closed-orbit - Abweichungen minimal sind. Die maximale Stärke der Korrekturmagnete liegt bei dieser Anzahl und Anordnung in der Größenordnung um 1 mrad. Diese Werte sind, wegen des relativ kleinen Strahlquerschnittes zu groß.

Eine Verminderung der "closed-orbit" - Abweichungen ist nur durch den Einbau weiterer Steerer möglich. Werden im Speicherring 48 Steerer für die horizontale - und ebenfalls 48 für die vertikale Richtung eingebaut, so ergeben sich zufriedenstellende Ergebnisse: die verbleibenden closed-orbit - Abweichungen sind kleiner als 0,1 mm und die Stärken der Steerer sind kleiner als 0,6 mrad. Die als optimal gefundene Anordnung der Steerer ist in Abb. 2.45 wiedergegeben. Hierbei sind  $ST_H$  und  $ST_V$  Steerer, die nur in horizontaler - bzw. vertikaler Richtung wirken;  $ST_{HV}$  sind Steerer, die in beiden Richtungen wirken. Insgesamt werden sowohl für die horizontale - als auch für die vertikale Richtung 48 Korrektur Elemente eingebaut.

Die closed-orbit - Abweichungen bei einer Fehlaufstellung von 0,2 mm vor und nach der "closed-orbit" Korrektur sind in Abb. 2.46 und die zugehörigen Stärken der Korrektur Elemente in Abb. 2.47 wiedergegeben. Wie sich aus Abb. 2.46 ergibt, sind die Abweichungen vom Sollorbit nach der Korrektur kleiner als 0,1 mm und somit kleiner als der Strahlquerschnitt. Die benötigten Stärken der Steerer sind kleiner als 0,6 mrad.

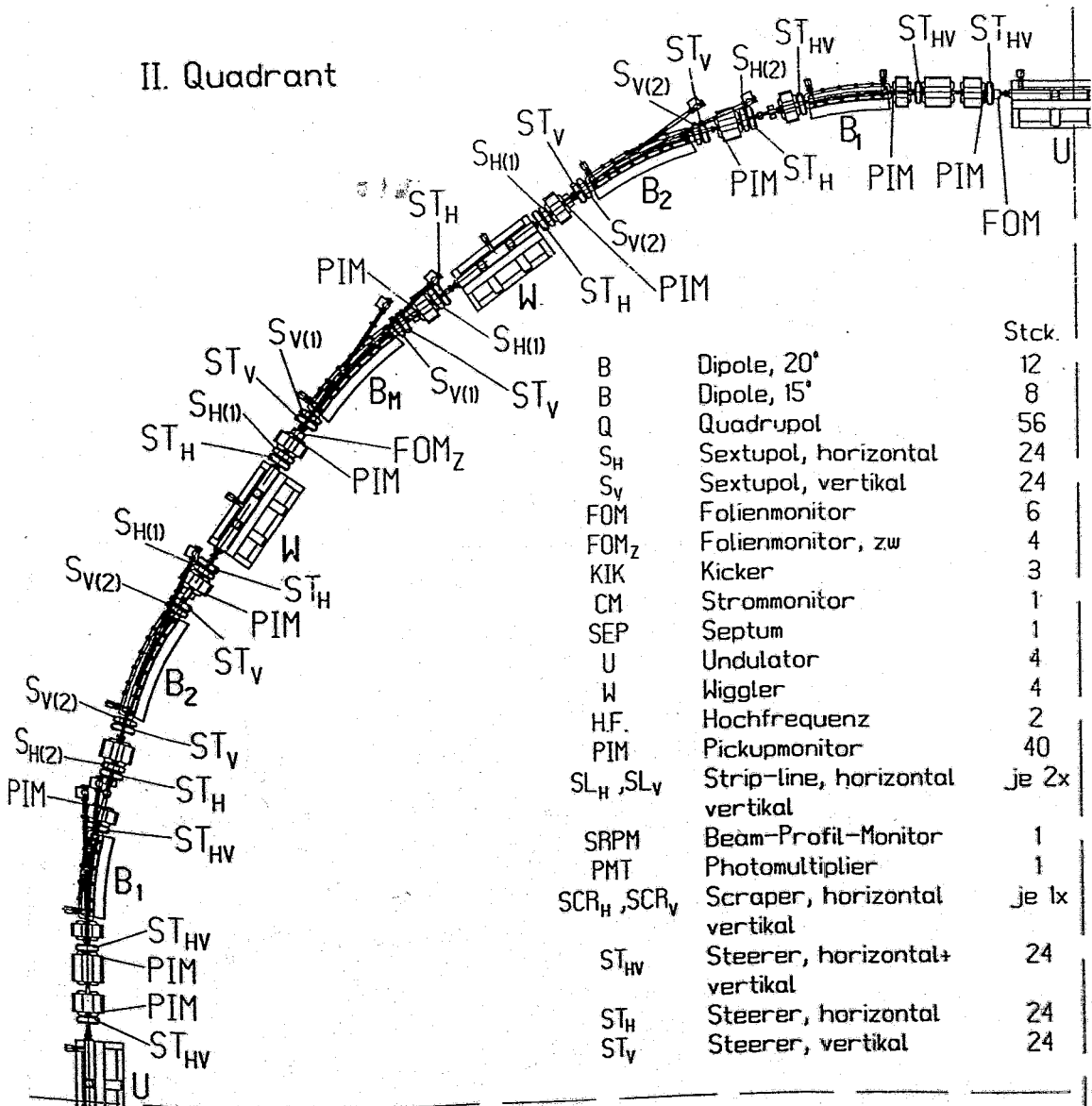


Abb. 2.45: Gewählte Anordnung der Korrektur Elemente in einem Quadranten von ROSY. ST<sub>H</sub> und ST<sub>V</sub> sind Steerer (jeweile 24 Stück), die in horizontaler bzw. vertikaler Richtung wirken, ST<sub>HV</sub> (ebenfalls 24 Stück) sind Elemente, die in beiden Richtungen wirken. PIM sind die Positionsmonitore, mit denen die Abweichung vom Sollwert ermittelt wird.

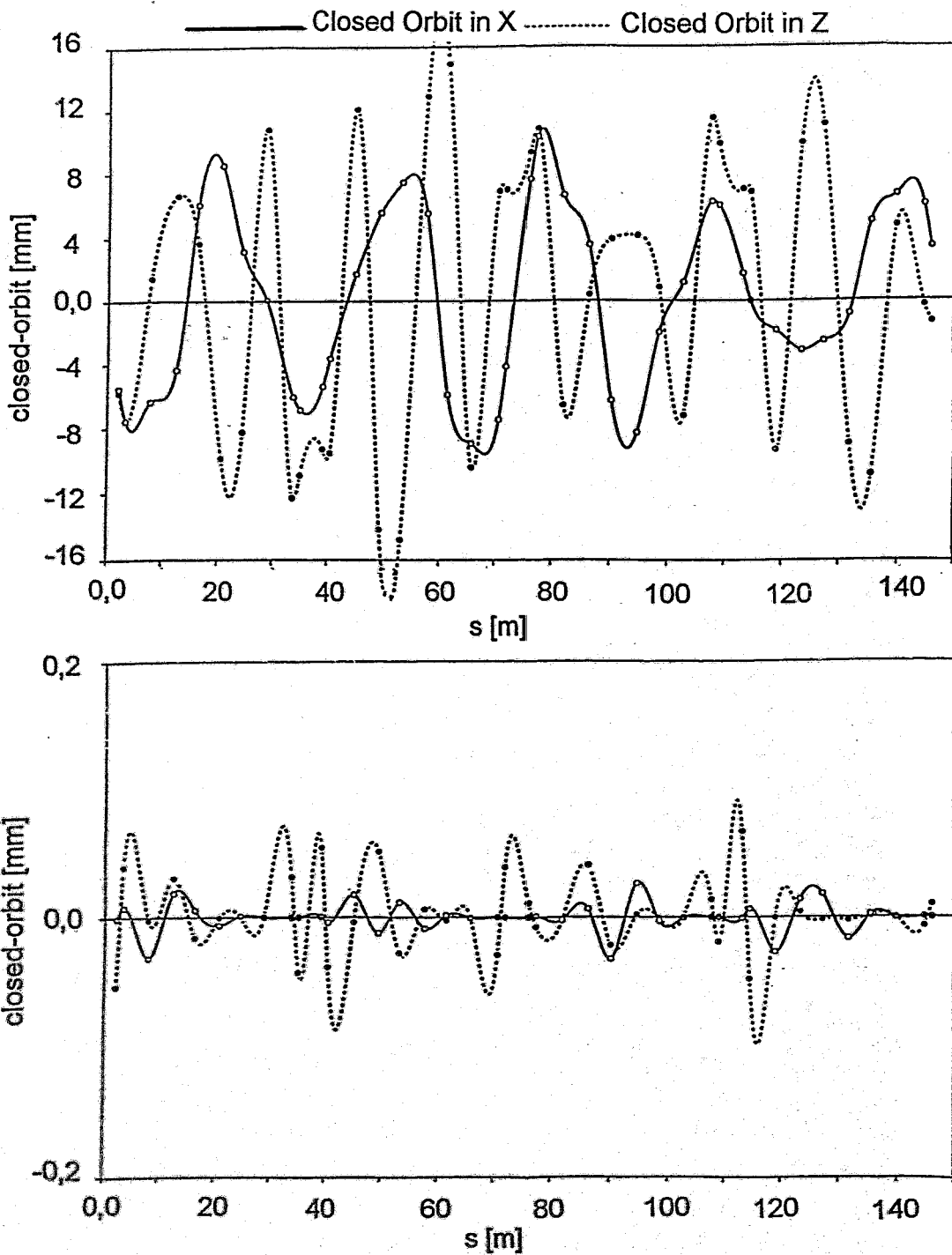


Abb. 2.46: Abweichungen vom Sollorbit vor und nach der Korrektur durch die Steerer. Die Fehlauflistung der Elemente betragt 0,2 mm.

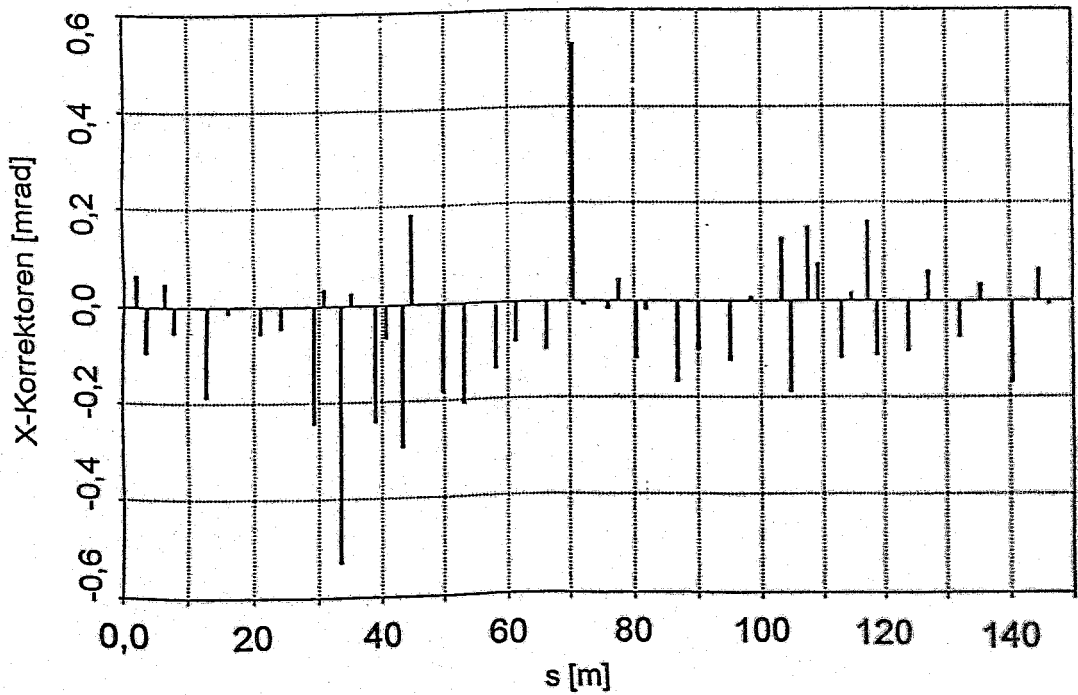
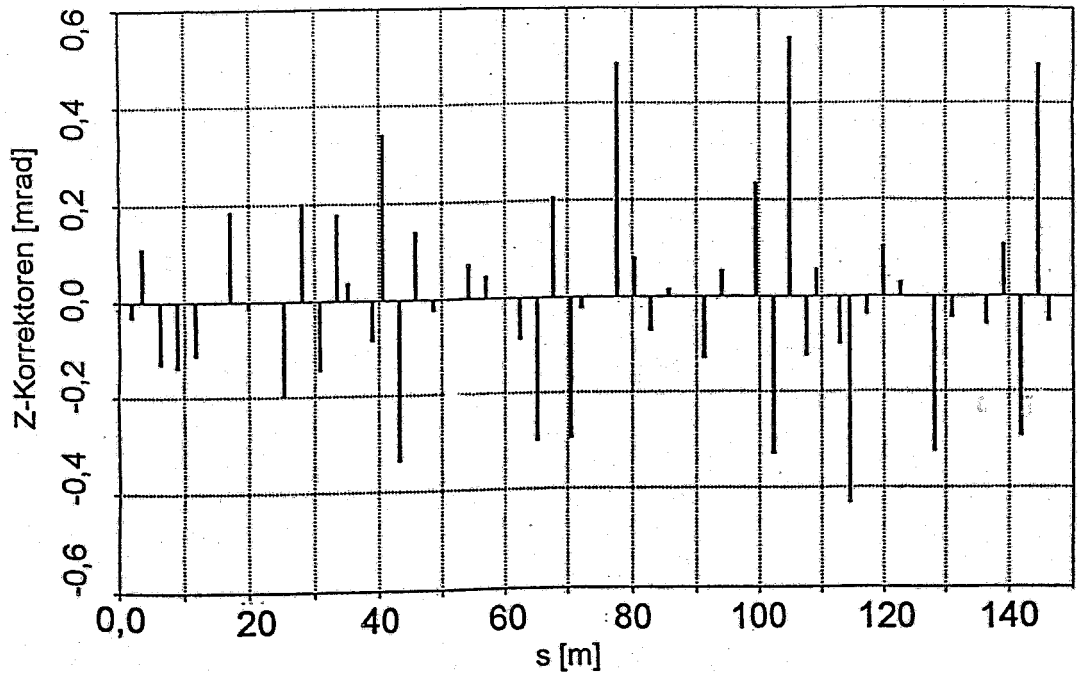


Abb. 2.47: Stärken der Korrektur Elemente für die in Abb. 2.46 durchgeführte closed-orbit - Korrektur (oben z-Richtung und unten x-Richtung).

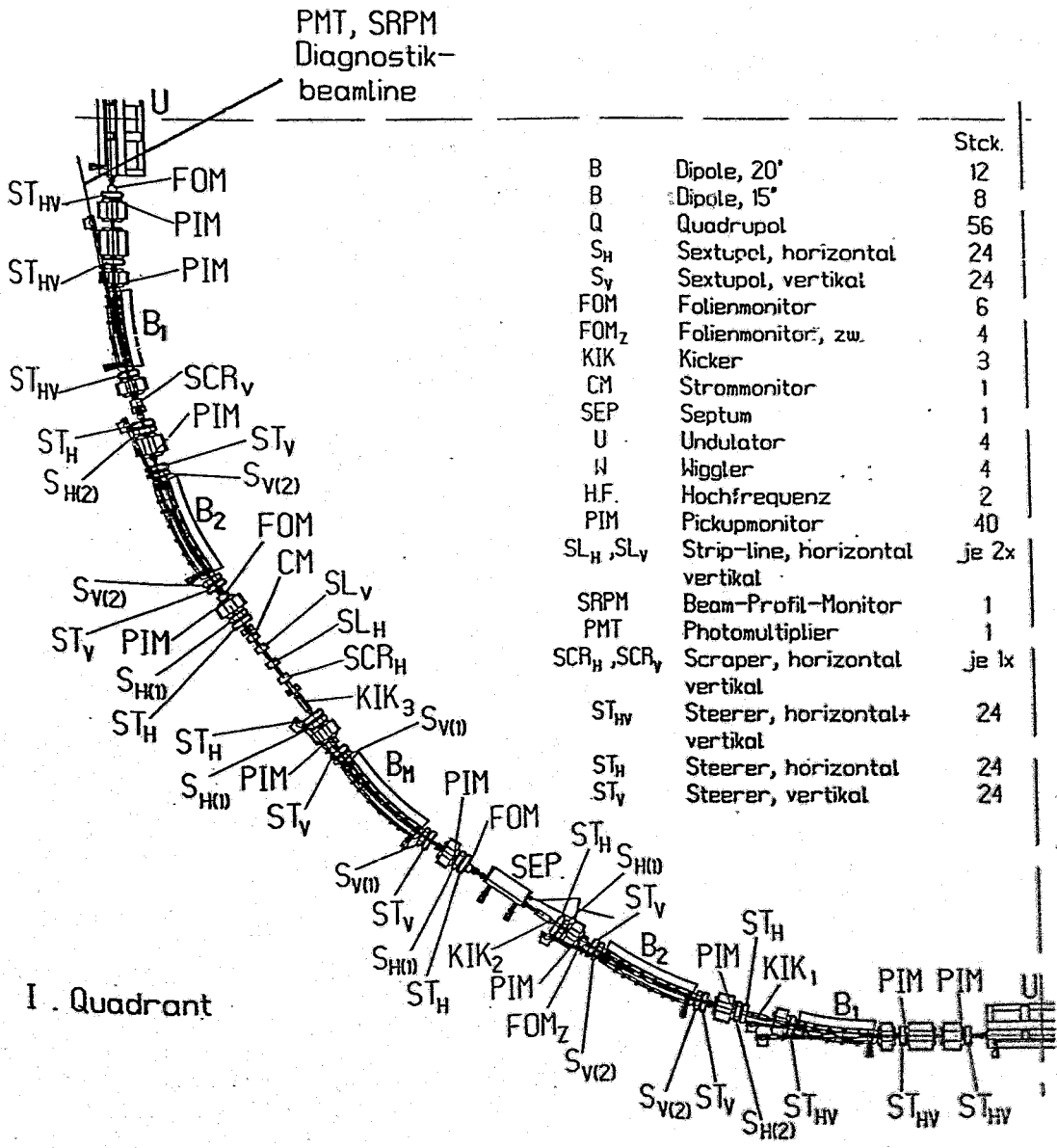
## 2.7 Aufbau des Speicherringes

Mit den in den Abschnitten 2.4 und 2.6 festgelegten Position der Sextupole und der Korrekturmagnete sind die Positionen aller Magnete festgelegt. Der Speicherring hat zwar eine Vierersymmetrie, doch wegen des Einbaues der HF - Cavities und der Injektionselemente werden die langen geraden Stücken in den Bögen unterschiedlich belegt und die Symmetrie ist maximal 2. Die Anordnung der verschiedenen Elemente im Quadranten II wurde bereits in Abb. 2.45 wiedergegeben. Die Anordnung der verschiedenen Elemente in den Quadranten I, III und IV sind in den Abb. 2.48, 2.49 und 2.50 dargestellt.

Die Anordnung aller Elemente in den Quadranten II (Abb. 2.45) und IV (Abb. 2.50) ist identisch. Im Quadranten I (Abb. 2.48) wird die Injektion durchgeführt und somit werden in diesen Quadranten die Injektionselemente, wie Kicker (insgesamt 4) und Septum eingebaut. Weiterhin wird in diesem Quadranten eine lange gerade Strecke als Diagnostik-Strecke vorgesehen. Hier werden die verschiedensten Diagnostikelemente ("Strip-line" Monitore und Scraper) eingebaut. Um die Zweiersymmetrie zu erhalten, werden in dem gegenüberliegenden Quadranten III die HF - Cavities eingebaut (siehe Abb. 2.49).

Zur Verdeutlichung der Platzverhältnisse sind in den Abb. 2.51 und 2.52 die Anordnung der Elemente in der Einheitszelle und in der Anpassungszelle in einem kleineren Maßstab dargestellt.

Die Nomenklatur  $S_H(2)$  bzw.  $S_V(2)$  bedeutet, daß dieser horizontal bzw. vertikal wirkende Sextupol doppelt so hoch erregt werden muß wie die Sextupole  $S_H$  und  $S_V$ .



		Stck.
B	Dipole, 20'	12
B	Dipole, 15'	8
Q	Quadrupol	56
S <sub>H</sub>	Sextupel, horizontal	24
S <sub>V</sub>	Sextupel, vertikal	24
FOM	Folienmonitor	6
FOM <sub>Z</sub>	Folienmonitor, zw.	4
KIK	Kicker	3
CM	Strommonitor	1
SEP	Septum	1
U	Undulator	4
W	Wiggler	4
H.F.	Hochfrequenz	2
PIM	Pickupmonitor	40
SL <sub>H</sub> , SL <sub>V</sub>	Strip-line, horizontal vertikal	je 2x
SRPM	Beam-Profil-Monitor	1
PMT	Photomultiplier	1
SCR <sub>H</sub> , SCR <sub>V</sub>	Scraper, horizontal vertikal	je 1x
ST <sub>HV</sub>	Steerer, horizontal+ vertikal	24
ST <sub>H</sub>	Steerer, horizontal	24
ST <sub>V</sub>	Steerer, vertikal	24

I. Quadrant

Abb. 2.48: Anordnung aller Elemente im Quadranten I ( Injektions -  
Quadrant) des Speicherringes ROSY





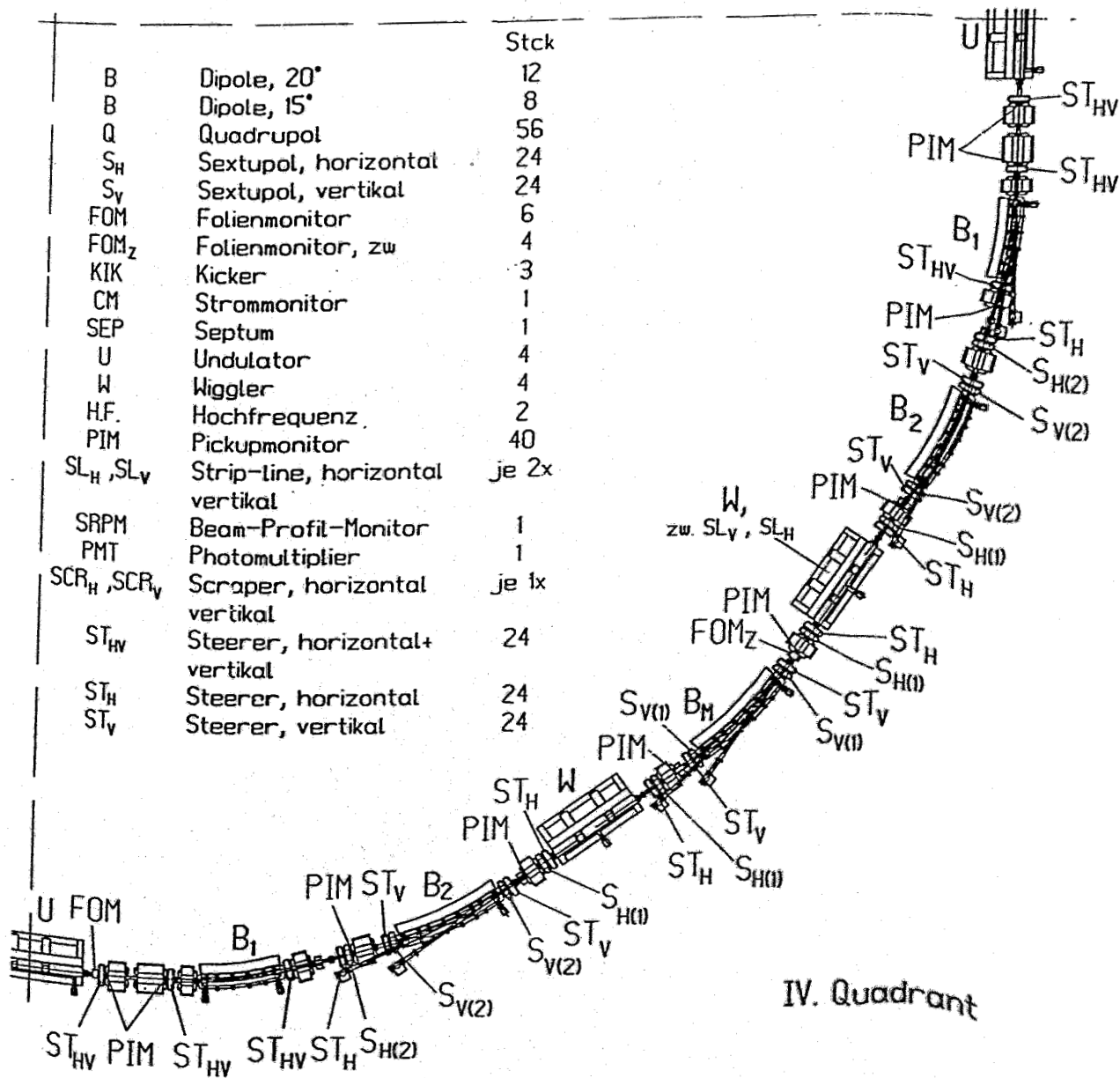


Abb. 2.50: Anordnung aller Elemente im Quadranten IV ( Insertion Device - Quadrant ) des Speicherringes ROSY

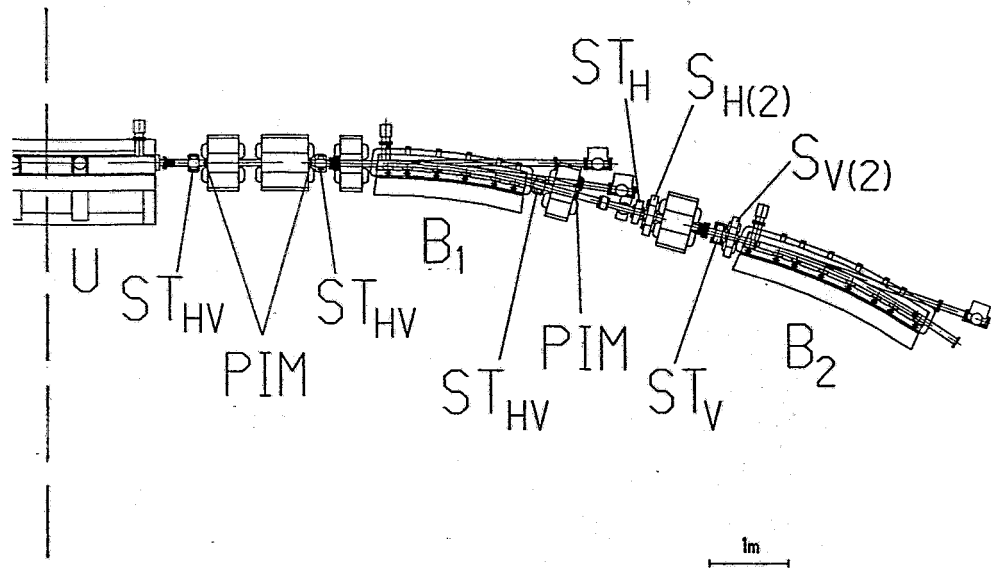


Abb. 2.51: Anordnung der aller Elemente im Bereich der Anpassungszelle

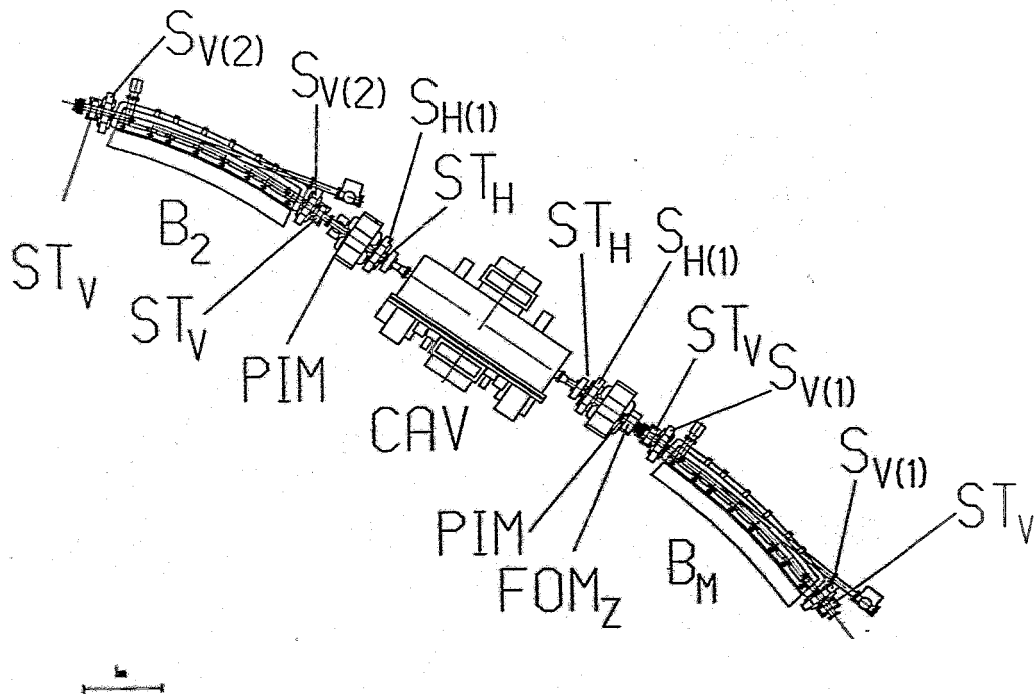


Abb. 2.52: Anordnung aller Elemente im Bereich der Einheitszelle

## 2.8 Ausbau von ROSY mit supraleitenden Magneten

Die Strahlungscharakteristiken der Synchrotronstrahlung sind bestimmt durch die kritische Wellenlänge  $\lambda_c$  oder die entsprechende kritische Energie  $E_c$ . Mit den Hauptparametern eines Speicherringes sind diese Größen wie folgt verbunden:

$$\lambda_c [\text{nm}] = 1,864 / [(B/T) (E/\text{GeV})^2] \quad \text{und} \quad (2.8)$$

$$E_c [\text{keV}] = 0,665 (B/T) (E/\text{GeV})^2 \quad (2.9)$$

Durch Veränderung der magnetischen Flußdichte in den Ablenkmagneten von 1,4 T (normalleitend) zu 4,5 T (supraleitend) wird die kritische Energie um etwa den Faktor 3 zu höheren Photonenenergien verschoben. Hierdurch wird der Anwendungsbereich einer Synchrotronstrahlungsquelle wesentlich vergrößert. In den Abb. 2.53 bis 2.55 werden der Photonenfluß, die Brillanz und die Photonenausbeute [Ro 92] der Synchrotronstrahlung aus den Ablenkmagneten von den Speicherringen BESSY II, ROSY (normalleitend), ROSY (supraleitend), DORIS und der ESRF dargestellt. Durch den Einbau von supraleitenden Magneten wird der nutzbare Spektralbereich von ROSY über den der ESRF hinausgeschoben und es ist möglich, mit Photonenenergien bis 100 keV zu experimentieren. Im besonderen soll hier auf die Photonenausbeute hingewiesen werden (Abb. 2.55), die bei ROSY für Photonenenergien  $E > 6$  keV vergleichsweise am größten ist. Diese liegt zwei Zehnerpotenzen über der von DORIS und um den Faktor zwei über der der ESRF. Die Photonenausbeute ist im Gegensatz zur Brillanz nur auf den Strahlquerschnitt normiert und nicht auf die Divergenz. Bei der Berechnung der Photonenausbeute wird davon ausgegangen, daß in der vertikalen Richtung die gesamte Strahlung genutzt wird und in der horizontalen der Öffnungswinkel durch die experimentelle Anordnung bestimmt wird. Hierbei wurde bei den verschiedenen Strahlungsquellen von folgenden horizontalen Öffnungswinkeln ausgegangen: ESRF: 3 mrad; DORIS: 7 mrad; BESSY II: 10 mrad und ROSY: 19 mrad.

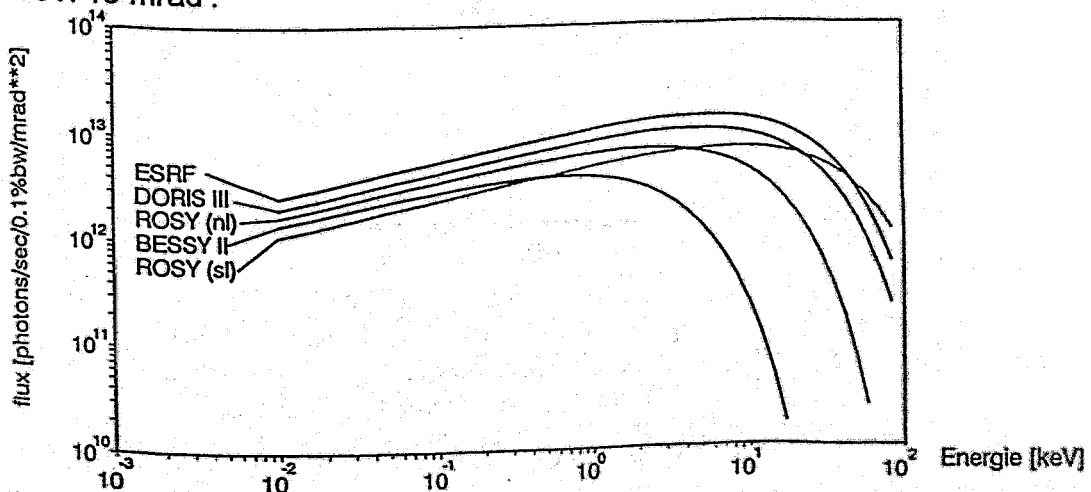


Abb. 2.53: Photonenfluß der Synchrotronstrahlung an den Ablenkmagneten von BESSY II, ROSY (normalleitend), ROSY (supraleitend) und DORIS.

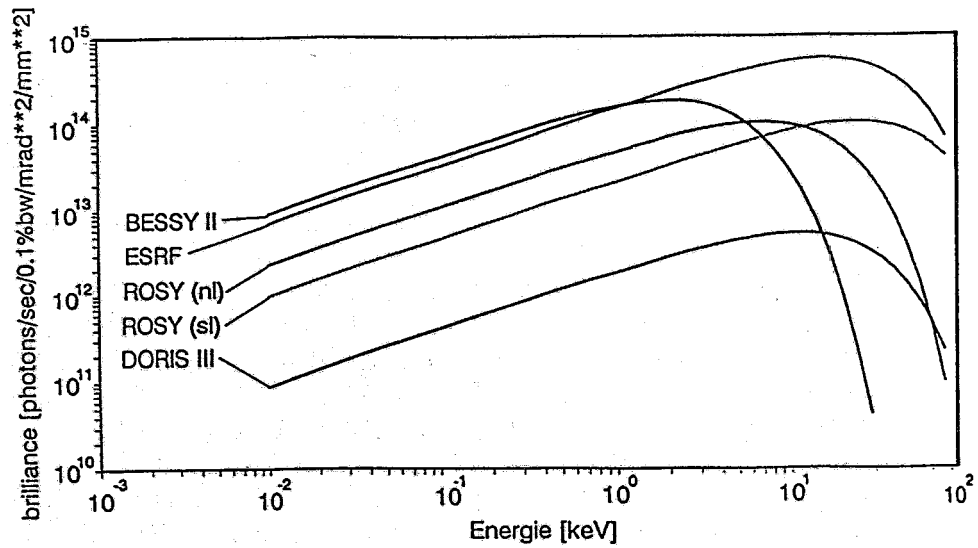


Abb. 2.54: Brillianzen der Synchrotronstrahlung aus den Ablenkmagneten der Speicherringe BESSY II, DORIS, ROSY (normalleitend) und ROSY (supraleitend).

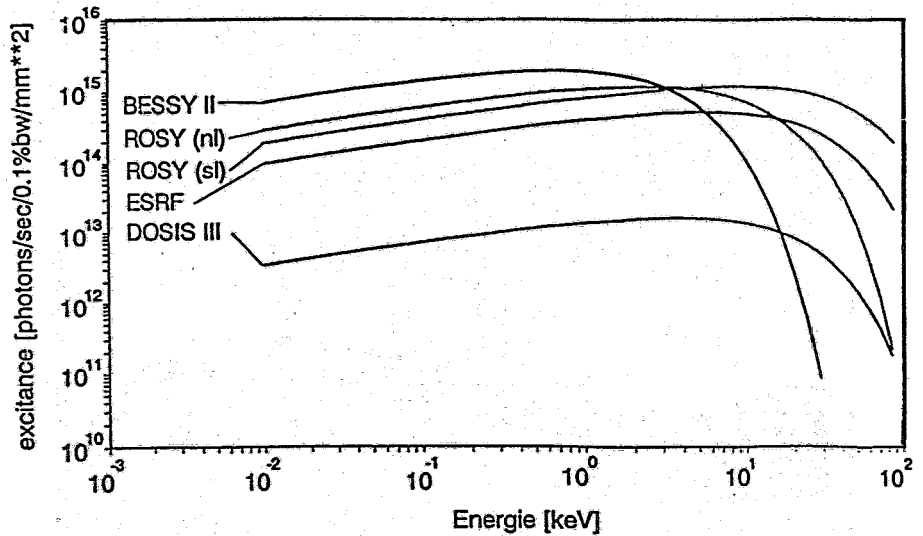


Abb. 2.55: Photonenausbeute der Synchrotronstrahlung aus den Ablenkmagneten der Speicherringe BESSY II, DORIS, ROSY (normalleitend) und ROSY (supraleitend).

Gewählte Öffnungswinkel:  $\theta_{\text{vert}} \geq \theta_{\text{syn}}$

Anlage	ESRF	BESSY	DORIS	ROSY
$\theta_{\text{hor}}$	3 mrad	10 mrad	7 mrad	19 mrad

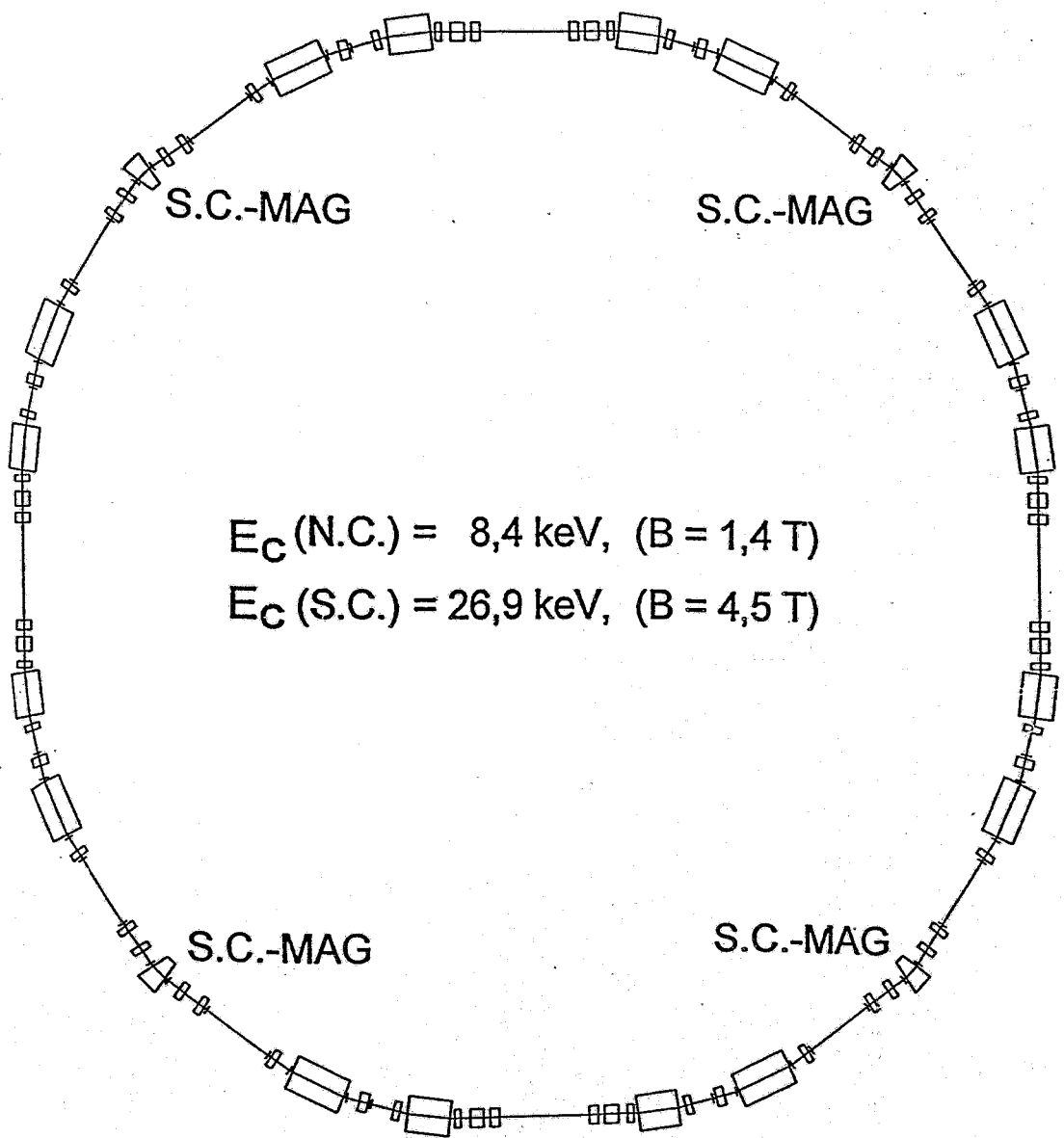


Abb. 2.56: Schematischer Aufbau des Speicherringes ROSY bei nachträglicher Verwendung von supraleitenden Magneten.

Der Einbau supraleitender Magnete muß von Anfang an vorgesehen werden oder die Magnetanordnung muß so flexibel sein, daß eine spätere Nachrüstung möglich ist. Wie bereits einleitend gesagt wurde, sollen an den Speicherringen DIAMOND und SLS supraleitende Magnete eingebaut werden. Die für ROSY gewählten Magnetoptik ist prädestiniert für den späteren Ausbau mit supraleitenden Magneten.

Wie in Abb. 2.1 angegeben, ist der Achromat von ROSY aus mehreren Einheitszellen und den Anpassungszellen aufgebaut. Nach Abschnitt 2.2 ist es möglich, die Einheitszelle als Quadruplett - oder als Dublett - Zelle aufzubauen. Für ROSY wurde die Dublett - Struktur gewählt. Nun ist es aber sehr einfach, die mittlere Einheitszelle bei ROSY zu ersetzen durch eine Quadruplett - Struktur und als Ablenk magnet in dieser Struktur einen supraleitenden Magneten zu nehmen. Der so veränderte Ausbau des Speicherringes ROSY ist in Abb. 2.56 dargestellt. Die Hauptparameter dieser Anordnung würden sich nur unwesentlich verändern.

Der Verlauf der Maschinenfunktionen innerhalb des Achromaten ist in Abb. 2.57 und die dynamische Apertur sowie die Abhängigkeit des Arbeitspunktes von der Energie und der Amplitude sind in Abb. 2.58 dargestellt. Diese Abhängigkeiten unterscheiden sich nur unwesentlich von der ROSY - Version mit normalleitenden Magneten. Aufgrund dieser Ergebnisse muß untersucht werden, ob nicht von Beginn an der Einbau der supraleitenden Magnete vorgesehen werden sollte.

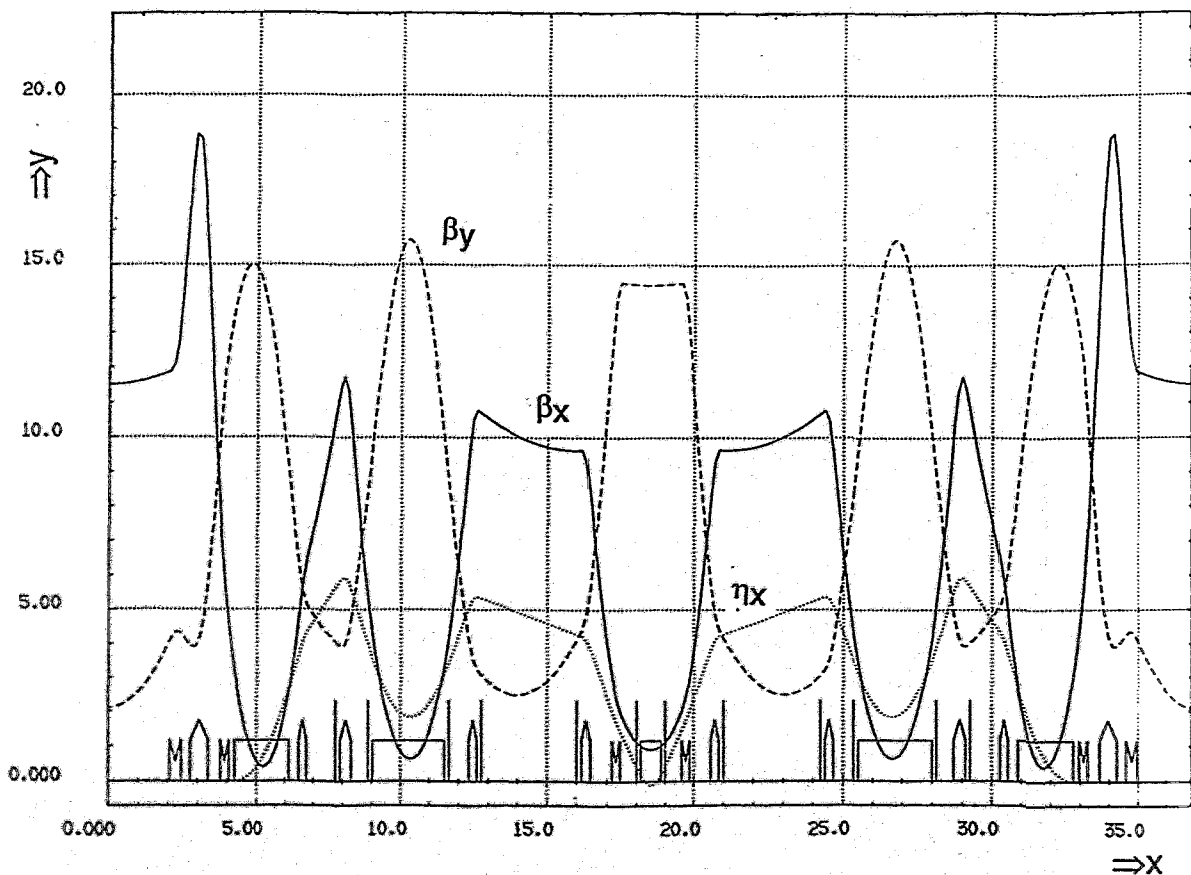
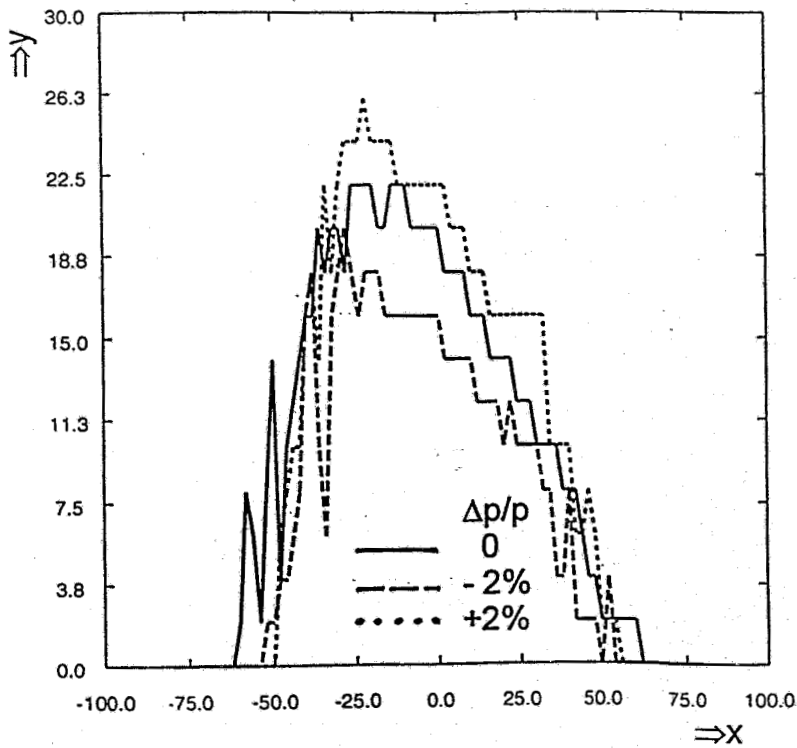
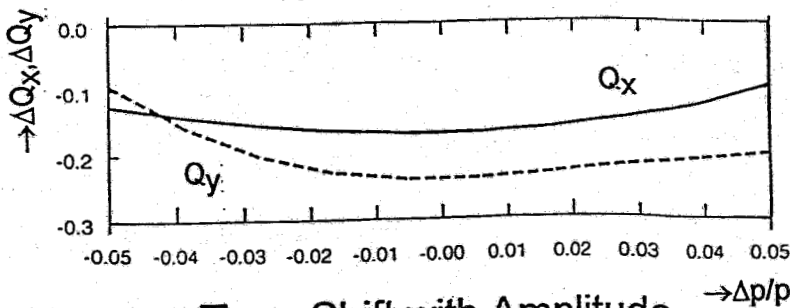


Abb. 2.57: Verlauf der Maschinenfunktionen in einem Achromaten von ROSY bei Verwendung von einem supraleitenden Ablenk magneten.

## Dynamic Aperture



## Energy Dependence of Tune



## Tune Shift with Amplitude

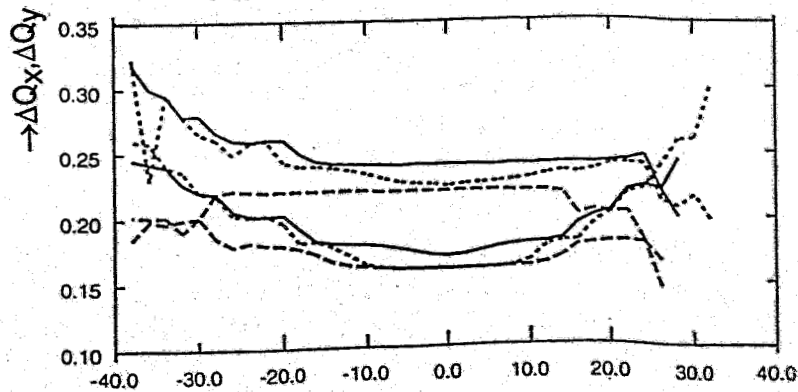


Abb. 2.58: Die dynamische Apertur und die Veränderung der Arbeitspunkte mit der Energie und der Amplitude bei der Einführung eines supraleitenden Magneten in den Achromaten von ROSY.

### 3 Strahllebensdauer für den ROSY-Speicherring

#### 3.1 Einleitung

Der Berechnung der Strahllebensdauer liegen Injektions- und Endenergie des Speicherringes zugrunde. Um bei den Berechnungen auf der "sicheren" Seite zu sein, werden hier 750 MeV als Injektionsenergie angenommen. (Design-Energie für die Injektion ist 800 MeV.) In Tab. 3.1 sind die Hauptparameter des Speicherringes zusammengefaßt.

Tab. 3.1: Parameter des ROSY-Speicherringes

Energie, E [GeV]	0,75	3,0
Umfang, U [m]	148,1	148,1
Dipolfeldstärke, $B_0$ [T]	0,35	1,4
Ablenkradius, $\rho$ [m]	7,15	7,15
Periodizität, $N_s$	4	4
Horizontaler Betatron-Tune, $\nu_x$	8,84	8,84
Vertikaler Betatron-Tune, $\nu_y$	4,75	4,75
Momentum Compaction Faktor, $\alpha$	0,0066	0,0066
Energieverlust pro Umlauf, $U_0$ [keV]	3,92	1002
Longitudinale Dämpfungszeit, $\tau_c$ [ms]	138,1	2,16
Horizontale Dämpfungszeit, $\tau_x$ [ms]	116,1	1,82
Natürliche Energiebreite, $\sigma_{e0}$	$2,91 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$
Natürliche Emittanz, $\varepsilon_0$ [nm rad]	1,78	28,5

#### 3.2 Begrenzungen durch die Mikrowelleninstabilität

Die Mikrowelleninstabilität begrenzt den zulässigen Peak-Strom ( $I_p \equiv Nec / \sqrt{2\pi\sigma_L}$ ) im Bunch. Der Grenzwert des Peakstroms wird für diese Instabilität nach folgender Formel [Br 75, Wa 80] berechnet:

$$I_p^{th} [A] \leq \frac{2\pi\alpha\sigma_E^2 E [eV]}{(Z_L/n) [\Omega]}, \quad (3.1)$$

wobei  $(Z_L/n)$  den Quotienten aus longitudinaler Breitband-Kopplungsimpedanz und Modenzahl  $n = \omega / \omega_0$  angibt. Wie groß exakt der Ausdruck  $(Z_L/n)$  ist, kann schlecht beantwortet werden, da dies noch Inhalt aktiver Forschung ist. Er wird in Analogie zu existierende Elektronen-Speicherringen zu  $(Z_L/n) = 5 \Omega$  gesetzt. Die berechneten Grenzwerte der Peakströme für Mikrowelleninstabilität sind für den ROSY-Ring entsprechend der Injektionsenergie von 750 MeV und der Nominalenergie von 3 GeV in Tab. 3.2 angegeben.



Tab. 3.2: Grenzwerte des Peakstromes infolge Mikrowelleninstabilität für  $Z_L/n = 5 \Omega$

$E [GeV]$	$\sigma_{E0}$	$I_p^{th} [A]$
0,75	$2,91 \cdot 10^{-4}$	0,52
3,0	$1,16 \cdot 10^{-3}$	33,6

Das Maximum für den mittleren Strom im Speicherring wird mit  $I_{ave}^{max} = 348$  mA angenommen. Bei 352 MHz sind 174 Impulspakete entlang der Umlaufbahn im Speicherring möglich. Es wird vorausgesetzt, daß der Speicherring zu etwa 80 % gefüllt ist, um Ion-Clearing zu gewährleisten. Pro Bunch beträgt dann der mittlere Strom: 2,5 mA. Die HF-Spannung wird so gewählt, daß die Strahlakzeptanz konstant bleibt. In Tab. 3.3 sind die Longitudinal-Parameter des Elektronenstrahls angegeben.

Tab. 3.3: Longitudinale Strahlparameter für "Null-Strom"

$E [GeV]$	$V_{HF} [MV]$	$\epsilon_{HF} [\%]$	$\sigma_{L0} [mm]$	$I_{ave}/bunch [mA]$	N/bunch	$I_p [A]$
0,75	0,5	1,93	4,1	2,5	$7,71 \cdot 10^9$	36,0
3,0	3,5	1,93	12,8	2,5	$7,71 \cdot 10^9$	11,5

Die berechneten Energiebreiten und Bunchlängen sind in Tab. 3.4 aufgeführt. Bei der Nominalenergie des Speicherringes wird die Bunchlänge durch seinen "natürlichen" Wert bestimmt. Bei der Injektionsenergie von 750 MeV muß dagegen geschlußfolgert werden, daß die Bunchlänge durch die Mikrowelleninstabilität bestimmt wird.

Tab. 3.4: Longitudinale Strahlparameter bestimmt durch Mikrowelleninstabilität

$E [GeV]$	$\sigma_z$	$\sigma_L [mm]$
0,75	$1,19 \cdot 10^{-3}$	16,7
3,0	$1,16 \cdot 10^{-3}$	33,6

### 3.3 Effekte durch Streuung innerhalb des Strahls (intrabeam scattering)

In der bisherigen Diskussion über die Elektronenstrahl-Abmessungen wurden die Wechselwirkungen der Elektronen untereinander im Bunch außer Acht gelassen. Die Elektronen führen jedoch aneinander Coulomb-Kleinwinkelstreuung aus, was zur "Aufheizung" der Elektronen sowohl in transversaler als auch in longitudinaler Richtung führt. Dieses sogenannte "intrabeam scattering (IBS)" wurde theoretisch in [Bj 83] untersucht und die Anstiegsraten der

Emittanz in transversaler und longitudinaler Richtung analysiert. Die Ausdehnung des Elektronenstrahls durch IBS überlagert sich den Strahlabmessungen. Die Gleichgewichtsparameter des Elektronenstrahls ergeben sich somit aus dem Gleichgewicht zwischen Anwachsen und Dämpfung, die durch die Emission der Synchrotronstrahlung hervorgerufen wird. Die Dämpfungszeiten  $\tau_i$  für den Speicherring berechnen sich zu

$$\tau_i [\text{ms}] = \frac{U[m]\rho[m]}{13.2 J_i (E[\text{GeV}])^3}, \quad i = x, y, e, \quad (3.2)$$

wobei  $J_i$  die Dämpfungskonstanten sind. Der Computer Code ZAP [Zi 86] wurde benutzt, um unter Berücksichtigung von IBS die Gleichgewichtsparameter für den Elektronenstrahl im ROSY-Speicherring zu berechnen. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.5 dargestellt.

Tab. 3.5: Der Einfluß von IBS auf den Elektronenstrahl bei 1% Emittanz-Kopplung

E [GeV]	$\tau_x$ [ms]	$\tau_e$ [ms]	$\epsilon_x^{IBS} / \epsilon_{x0}$	$\epsilon_y^{IBS} / \epsilon_{y0}$	$\sigma_L^{IBS} / \sigma_L$
0,75	116,1	138,1	3,8	3,8	1,0
3,0	1,82	2,16	1,0	1,0	1,0

### 3.4 Die Lebensdauer des Elektronenstrahls

Die Lebensdauer im Elektronen-Speicherring ist gegeben durch eine Kombination von Prozessen, die zu Teilchenverlusten im Bunch führen [Le 85]. Die Lebensdauer für die elastische Streuung der Elektronen an den Atomkernen des Restgases ist gegeben durch

$$\frac{1}{\tau_{scat}} = \frac{4r_e^2 Z^2 \pi \rho c}{2\gamma^2} \left[ \frac{\langle \beta_x \rangle}{A_x} + \frac{\langle \beta_y \rangle}{A_y} \right], \quad (3.3)$$

wobei  $r_e = 2,82 \cdot 10^{-15}$  m, der klassische Elektronenradius ist. Die Größen  $Z$  und  $\rho$  stellen Atomzahl und Dichte des Restgases dar. Die physikalische Akzeptanz wird durch die Ausdrücke  $A_x = \min(a^2/\beta_x)$  und  $A_y = \min(b^2/\beta_y)$  beschrieben, wobei  $a$  und  $b$  die halben Aperturabmessungen der Vakuumkammer in  $x$ - und  $y$ -Richtung darstellen.

Die physikalische Apertur in horizontaler und vertikaler Richtung sind mit  $\pm 30$  mm und 20 mm angenommen, wobei eine Maßabweichung von 1 mm für den Closed-Orbit noch veranschlagt werden sollte. Die horizontale Akzeptanz wird für den Ort mit größtem  $\beta$ -Wert festgelegt, so daß  $a = 29$  mm und  $\beta_x^{\max} = 19$  m/rad sind. Die vertikale Akzeptanz ist in der Dipol-

Vakuumkammer mit  $b = 19 \text{ mm}$  und  $\beta_y^{\max} = 18 \text{ m/rad}$  fixiert. Die Mittelwerte der Betatron-Funktionen sind  $\langle \beta_x \rangle = 7,68 \text{ m/rad}$  und  $\langle \beta_y \rangle = 7,88 \text{ m/rad}$ .

Die Lebensdauer, die durch Bremsstrahlung an den Atomkernen des Restgases verursacht ist, wird berechnet zu

$$\frac{1}{\tau_{\text{brem}}} = \frac{16r_e^2 Z^2 \rho c}{411} \left[ \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \right] [-\ln \varepsilon_{\text{HF}} - 5/8], \quad (3.4)$$

wobei  $\varepsilon_{\text{HF}} = 1,93\%$  die HF-Akzeptanz ist.

Die Lebensdauer, die durch die elastische Streuung der Elektronen an den Atomkernen bestimmt wird, ist gegeben durch

$$\frac{1}{\tau_{\text{el}}} = \frac{2\pi r_e^2 Z c \rho}{\gamma \varepsilon_{\text{HF}}} \quad (3.5)$$

Die Lebensdauer für unelastische Streuung der Elektronen am Restgas ist

$$\frac{1}{\tau_{\text{unel}}} = \frac{16r_e^2 Z^2 \rho c}{411} \left\{ \ln \frac{2,5\gamma}{\varepsilon_{\text{HF}}} - 1,4 \right\} [-\ln \varepsilon_{\text{HF}} - 5/8]. \quad (3.6)$$

In Tab. 3.6 ist die Lebensdauer für elastische und unelastische Streuung am Restgas unter der Annahme eines Druckes von  $3 \cdot 10^{-9} \text{ mbar}$  ( $2 \cdot 10^{-9} \text{ Torr}$ ) für ein zweiatomige Gas der Ordnungszahl  $Z = 7$  (Stickstoff) angegeben.

Die Touschek-Lebensdauer für Streuung innerhalb eines Elektronenbunches wird berechnet zu

$$\frac{1}{\tau_{\text{Tous}}} = \frac{\ln 2 \cdot \sqrt{\pi} r_e^2 N C(\zeta)}{\sigma_x \gamma^3 \varepsilon_{\text{acc}}^2 V}, \quad (3.7)$$

wobei  $V = 8\pi^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_x \sigma_y \sigma_L$ ,  $\zeta = \left( \frac{\varepsilon_{\text{acc}}}{\gamma \sigma_x} \right)^2$  ist und  $C(\zeta)$  ein Integral nach

[Le 85] darstellt. In Tab. 3.6 ist die Touschek-Lebensdauer für 1% Emittanz-Kopplung angegeben.

Wegen der Quanteneigenschaft der Strahlungsemission entstehen beim Umlauf der Elektronen Abweichungen der Elektronenenergie, die bei der endlichen Energieakzeptanz der Maschine zu Teilchenverluste führen [Sa 70]. Die Lebensdauer für diesen Effekt beträgt

$$\tau_{qe} = \frac{\tau_e e^{\xi}}{2 \xi} \quad (3.8)$$

mit  $\xi = \frac{\xi_{\max}^2}{2\sigma_x^2}$ . Zusätzliche Teilchenverluste können auch durch die physikalische Apertur entstehen. Die entsprechende Lebensdauer wird nach [Sa 70] berechnet zu

$$\tau_{\text{phys}} = \frac{\tau_x \langle W \rangle}{2 \hat{W}} e^{\hat{W}/\langle W \rangle} \quad (3.9)$$

wobei  $\hat{W} = [a^2 \beta_x(s)]_{\max}$  und  $\langle W \rangle = 2\sigma_x^2(s)$  sind. Jedoch ist die Bedeutung dieser beiden Effekte, Energieapertur und physikalische Apertur, im Falle des ROSY-Speicherringes vernachlässigbar.

In Tab. 3.6 sind die Beiträge der Lebensdauer des Elektronenstrahls für den ROSY-Speicherring zusammengefaßt.

Tab. 3.6: Lebensdauern des Elektronenstrahls im ROSY-Speicherring  
( $P = 3 \cdot 10^{-9}$  mbar,  $Z = 7$ , zweiatomiges Gas,  
1% Emittanz-Kopplung)

E [GeV]	$\tau_{\text{scat}}$ [h]	$\tau_{\text{brem}}$ [h]	$\tau_{\text{el}}$ [h]	$\tau_{\text{unel}}$ [h]	$\tau_{\text{Tous}}$ [h]	$\tau_{\text{tot}}$ [h]
0,75	11	31	570	91	4,5	2,8
3,0	175	31	2280	81	209	18

## 4 Einfluß von Wiggler und Undulatoren auf die Strahlparameter des Speicherringes ROSY

Im Speicherring ROSY ist der Einbau von Wiggler und Undulatoren als Strahlquelle mit hohem Photonenfluß bzw. hoher Brillianz vorgesehen. Die Magnete bei diesen Anordnungen, die auch als Insertion Devices bezeichnet werden, sind als Blöcke in longitudinaler Richtung aneinandergereiht und die Elektronenbahnen vollführen beim Durchlauf dieser Anordnung Sinusschwingungen. Mit dem Einbringen der Insertion Devices in den Speicherring wird eine Störung eingebaut, die zu einer Änderung des Verlaufes der Maschinenfunktionen ( $\beta_x$ ,  $\beta_y$  und  $\eta_x$ ) führt und sich somit ein anderer Arbeitspunkt bzw. eine andere Emittanz ergibt. Im Speicherring ROSY ist es vorgesehen, insgesamt acht Insertion Devices einzubauen, vier davon an Stellen mit einer Dispersionsfunktion  $\eta_x \neq 0$ . Im folgenden soll der Einfluß dieser Elemente auf das Verhalten des Arbeitspunktes und der Emittanz untersucht werden.

### 4.1 Arbeitspunktverschiebung beim Einbau von Wiggler und Undulatoren

Damit die Elektronen in den Insertion Devices eine sinusförmige Bahn durchlaufen, muß die magnetische Flußdichte in diesen Anordnungen ganz bestimmten Bedingungen genügen und es ist nur ein solcher Feldverlauf gestattet, der den Maxwell'schen Gleichungen nicht widerspricht. Dies geschieht zum Beispiel durch folgenden Verlauf [CA 90]:

$$\begin{aligned} B_x &= 0,0 \\ B_y &= B_U * \cosh(k_U y) * \cos(k_U s) \\ B_s &= -B_U * \sinh(k_U y) * \sin(k_U s) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Die entsprechende Transformationmatrix zur Beschreibung des Verlaufes der Elektronenbahnen nach Gl. (4.1) lautet:

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & L_U \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{Y} L_U) & \frac{1}{\sqrt{Y}} \sin(\sqrt{Y} L_U) \\ -\sqrt{Y} \sin(\sqrt{Y} L_U) & \cos(\sqrt{Y} L_U) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Hierin bedeuten:

$L_U$  = Länge der Insertion Devices  
 $\lambda_U$  = Periodenlänge der Insertion Devices  
 $Y$  = Qudrupolstärke der Insertion Devices

$$\sqrt{Y} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{Kk_U}{\gamma} \quad (4.4)$$

$$k = \frac{eB_0\lambda_U}{2\pi m_e c} = 0,934 [B/T] [\lambda_U / cm] \quad (4.5)$$

$$k_U = 2\pi / \lambda_U \quad (4.6)$$

Mit den Matricelementen (Gl. (4.2) und Gl. (4.3) ) verhält sich der Undulator/Wiggler in der x - Richtung wie eine Driftstrecke und in der y - Richtung wie ein fokussierender Qudrupol mit der Stärke:

$$Y = \frac{1}{2} \frac{K^2 k_U^2}{\gamma^2} \quad (4.7)$$

Durch Einsetzen der Konstanten und unter Berücksichtigung des maximalen Ablenkradiuses  $\rho_U$  ergibt sich die integrierte Qudrupolstärke zu:

$$\int Y dl = L_U / (2\rho_U^2) \quad (4.8)$$

Bei ROSY ist es vorgesehen, die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Insertion Devices zu verwenden. Damit ergeben sich integrierte Qudrupolstärken von  $2 \cdot E-03$  bis  $2 \cdot E-02 \cdot m^{-1}$ . Diese sind um mindestens den Faktor 20 kleiner als die der Qudrupole und somit können die Insertion Devices als Störungen mit einem Fehler  $\Delta k$  angesehen werden.

Tabelle 4.1 : Parameter, der für ROSY vorgesehenen Insertion Devices

	Undulator	Wiggler
$\lambda_U$ [cm]	5,2	10,4
$B_{max}$ [T]	0,461	1,1
$K_{max}$	2,239	10,68
Länge [m]	2,6	3,12
$N_U$	50	30
$\rho_U$ [m]	21,71	9,1
$Y$ [m-2]	1,06 E-3	6,04 E-3
$Y L_U$ [m-1]	2,76 E-3	1,88 E-2

Die Arbeitspunktverschiebung durch einen Gradientenfehler und damit einem Fehler  $\Delta k$  der Quadropolstärke errechnet sich zu :

$$\Delta Q_{x,y} = -\frac{1}{4\pi} \langle \beta_{x,y} \rangle \Delta k l \quad (4.9)$$

oder angewandt auf einen Wiggler/Undulator:

$$\begin{aligned} \Delta Q_x &= 0,0 \\ \Delta Q_y &= \frac{1}{4\pi} \langle \beta_y \rangle Y L_U \quad (4.10) \\ &= \frac{1}{8\pi} \frac{L_U \langle \beta_y \rangle}{\rho_U^2} \end{aligned}$$

Mit den in Tabelle 4.2 wiedergegebenen Daten der Maschinenfunktionen am Ort der Wiggler und Undulatoren folgen die in Tabelle 4.3 berechneten Arbeitspunktverschiebungen für verschiedene Energien. Da diese umgekehrt proportional dem Quadrat des Ablenkradiuses sind, kann die Verschiebung durch den Undulator vernachlässigt werden.

Tabelle 4.2: Werte der magnetoptischen Funktionen am Ort der Wiggler und Undulatoren. Wiggler befinden sich in den langen geraden Strecken und Undulatoren in den geraden Strecken im Bogen von ROSY.

Parameter	Undulatoren	Wiggler
$\beta_x$ [m/rad]	11,98	11,50
$\beta_y$ [m/rad]	2,38	2,10
$\eta_x$ [m]	0,468	0

Tabelle 4.3: Arbeitspunkte bei Verwendung mehrerer Wiggler und bei verschiedenen Energien.

Anzahl der Wiggler	Undulatoren	$Q_y$	
		$E = 0,8 \text{ GeV}$	$E = 3 \text{ GeV}$
0	0	4,748	4,748
1	0	4,792	4,751
2	0	4,851	5,750
4	0	4,925	4,761
4	4	4,954	4,763

Aus der Tabelle 4.3 ist zu entnehmen, daß die Arbeitspunktverschiebung für eine Energie von  $E = 3$  GeV zu vernachlässigen und der Einfluß der Undulatoren wirklich klein ist. Bei der Injektionsenergie ist diese jedoch erheblich und kann zu einem Strahlverlust führen. Der Einfluß der Wiggler auf die Arbeitspunktverschiebung ist reduzierbar, wenn diese während der Injektionsphase geöffnet werden. Dies ist eine allgemein übliche Praxis.

Die Einschränkung der dynamischen Apertur durch den Einbau der Wiggler und Undulatoren bei einer Energie von  $E = 3$  GeV wurde bereits im Abschnitt 2.4 behandelt und ist nicht von großem Einfluß.

## 4.2 Einfluß der Wiggler auf die Emittanz des Speicherringes

Die Emittanz in einem Speicherring ohne den Einbau von Wiggler ( $\varepsilon_0$ ) ist gegeben durch folgendes Integral:

$$\varepsilon_0 = c_q \gamma_0^2 \frac{1}{J_x} \frac{\int \frac{H}{Dip} |\rho_M|^3 ds}{\int \frac{1}{Dip} \rho_M^2 ds} \quad (4.11)$$

Hierin bedeuten:

$$C_q = 3,84 \cdot 10^{-13} \text{ m}$$

$$\gamma_0 = 1957 \cdot (E/\text{GeV}), \text{ reduzierte Energie}$$

$$J_x = \text{Partition-funktion in horizontaler Richtung}$$

$$\rho_M = \text{Ablenkradius im Magneten}$$

und

$$H = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_x' + \beta_x \eta_x'^2 \quad (4.12)$$

mit

$$\alpha = -\frac{1}{2}\beta_x \quad \text{und} \quad \gamma_x = \frac{1 + \alpha_x^2}{\beta_x} \quad (4.13)$$

Die Integrale in Gl. (4.11) sind dabei über alle Dipole im Speicherring zu berechnen, d.h. der isomagnetische Fall ist nicht vorausgesetzt [Ei 92].

Mit dem Einbau von Wiggler müssen die Beiträge der Magneten in den Wiggler zur  $H$  - Funktion als auch im Nenner von Gl. (4.11) berücksichtigt werden und die Emittanz berechnet sich dann zu:

$$\varepsilon_x(w_i) = c_q \gamma_0^2 \frac{1}{J_x} \frac{\int \frac{H}{Dip} |\rho_M|^2 ds + \int \frac{H}{Wig} |\rho_{Wi}|^3 ds}{\int \frac{1}{Dip} \rho_M^2 ds + \int \frac{1}{Wig} \rho_{Wi}^2 ds} \quad (4.14)$$



Dies Integral kann wie folgt umgewandelt werden und es ergibt sich der von Wiedemann [Wi 88] angegebene Ausdruck:

$$\varepsilon_x(Wig) = \varepsilon_o \frac{1 + \left[ \int_{Wig} \frac{H}{|\rho_{Wig}|^3} ds \right] / \left[ \int_{Dip} \frac{H}{|\rho_M|^3} ds \right]}{1 + \left[ \int_{Wig} \frac{1}{\rho_{Wig}^2} ds \right] / \left[ \int_{Dip} \frac{1}{\rho_M^2} ds \right]} \quad (4.15)$$

Mit den Ergebnissen:

$$\int_{Dip} \frac{1}{\rho_M^2} ds = \frac{2\pi\rho_M}{\rho_M^2} \quad (4.16)$$

und

$$\int_{Wig} \frac{1}{\rho_{Wig}^2} ds = \frac{1}{2} \frac{\sum \rho_{Wig}}{\rho_{Wig}^2} \quad (4.17)$$

geht die Gl. (4.15) über in:

$$\varepsilon_x(Wig) = \varepsilon_o \frac{1 + \left[ \int_{Wig} \frac{H}{|\rho_{Wig}|^3} ds \right] / \left[ \int_{Dip} \frac{H}{|\rho_M|^3} ds \right]}{1 + \frac{1}{2} \frac{\sum l_{Wig}}{2\pi\rho_M} \frac{\rho_M^2}{\rho_{Wig}^2}} \quad (4.18)$$

Bei der Berechnung der Gl. (4.17) ist von einer realistischen Wigglerperiode ausgegangen worden und zwar mit folgender Abhängigkeit des Ablenkradiuses innerhalb einer halben Wigglerperiode:

$$\rho(s) = +\rho_{Wig} \frac{1}{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{Wig}} s\right)} \quad (4.19)$$

Die Gl. (4.18) stimmt bis auf den Faktor 1/2 mit Wiedemann [Wi 88] überein. Die Diskrepanz durch den Faktor 1/2 ist dadurch gegeben, daß Wiedemann im Wiggler einen konstanten Ablenkradius annimmt. Ein "realistischer" Wiggler muß nach Gleichung (4.19) berechnet werden.

Werden Wiggler nur in dispersionsfreien Strecken ( $\eta_x = \dot{\eta}_x = 0$ ) untergebracht, dann ist das Integral:

$$\int_{Wig} \frac{H}{|\rho_{Wig}|^3} ds = 0 \quad (4.20)$$

und es kommt zu einer Verkleinerung der Emittanz, die durch die Verlängerung der Elektronenbahnen in den Wigglern gegeben ist.

Für nicht dispersionsfreie Strecken muß das Integral nach Gl. (4.20) berechnet werden. Hierzu wurde die H - Funktion in den Strecken berechnet, in denen Wiggler eingebaut werden sollen. Hier zeigt es sich, daß der Verlauf der Beiträge zur H - Funktion (siehe Gl. (4.12))  $\gamma_x \eta_x^2 + \beta_x \eta_x'^2$  und  $-2\alpha_x \eta_x \eta_x'$  den gleichen Verlauf haben und die H - Funktion somit konstant ist. Im Falle von ROSY ergibt sich ein Wert von  $H_{Wig} = 0,0468$ . Ist  $H = \text{const.}$ , dann geht das Integral nach Gl.(4.20) über in:

$$\int_{Wig} \frac{H_{Wig}}{|\rho_{Wig}|^3} ds = H_{Wig} \int_{Wig} \frac{1}{|\rho_{Wig}|^3} ds = \frac{4}{3\pi} \frac{H_{Wig} \sum L_{Wig}}{\rho_{Wig}^3} \quad (4.21)$$

Hierbei ist  $\sum L_{Wig}$  die Gesamtlänge aller in den Speicherring an den Stellen  $\eta_x = 0$  eingebrachten Wigglern. Mit diesen Ableitungen geht die Gl. (4.18) über in:

$$\varepsilon_x(Wig) = \varepsilon_o \frac{1 + \left[ \frac{4}{3\pi} \frac{H_{Wig} \sum L_{Wig}}{\rho_{Wig}^3} \Big/ \int_{Dip} \frac{H}{|\rho_M|^3} ds \right]}{1 + \frac{1}{4\pi} \left( \frac{\sum L_{Wig} \rho_M}{\rho_{Wig}^2} + \frac{\sum L_{Und} \rho_M}{\rho_{Und}^2} \right)} \quad (4.22)$$

Mit den für ROSY angegebenen Daten ( siehe Tabelle 4.1 und 4.2 ) berechnet sich der Zähler in Gl. (4.22) zu 1,002 und der Nenner zu 1,098 und insgesamt ergibt sich durch den Einbau von Wigglern und Undulatoren bei ROSY :

$$\varepsilon_x(Wig) = \frac{1,002}{1,098} \varepsilon_o = 0,92 \varepsilon_o \quad (4.23)$$

d.h. eine 8-prozentige Verkleinerung der Emittanz.

Bei der Verwendung von Ablenkmagneten mit fokussierender Funktion verändert sich die "Partition - function"  $J_x$  ebenfalls durch den Einbau von Insertion Devices. Für diese gilt:

$$J_x = 1 - D \quad (4.24)$$

$$D = \frac{\oint \frac{\eta}{\rho^3} (1 + 2k\rho^2) ds}{\oint \frac{1}{\rho^2} ds} \quad (4.25)$$

Unter Berücksichtigung, daß der Zähler in der D - Funktion bei Wigglern null ist, da  $\rho^3$  sowohl positive als auch negative Werte annimmt, geht die D - Funktion beim Einbau von Insertion Devices über in:

$$D(Wig) = D_o \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\sum L_{wig} \rho_M^2}{2\pi\rho_M \rho_{wig}^2}} \quad (4.26)$$

Für ROSY berechnet sich diese zu :  $D(Wig) = -0,5736$  und  $J_x = 1 - D(Wi) = 1.574$ . Damit ergibt sich folgendes Verhältnis:

$$\frac{J_x(Wig)}{J_x(M)} = \frac{1,574}{1,497} = 1,051 \quad (4.27)$$

und  $\varepsilon_x(Wig) = \varepsilon_o * 0,92 * 1,051 = \varepsilon_o * 0,967 \quad (4.28)$

D.h. die Emittanz bleibt durch den Einfluß der Wiggler und Undulatoren in etwa erhalten, sie ändert sich nur minimal. Dieses Ergebnis ist auch verständlich, denn die Wiggler mit dem größten Einfluß sind in den dispersionsfreien Strecken und die Undulatoren in den Strecken mit Dispersionsfunktion untergebracht. Die Wiggler führen zu einer Emittanzverkleinerung und die Undulatoren zu einer Emittanzvergrößerung.

Bei diesen Rechnungen wurde die Tatsache, daß mit dem Einbau der Wiggler sich auch ein anderer Verlauf der Dispersionsfunktion ergibt, nicht berücksichtigt [Wi 91]. Dies wird zu gegebener Zeit nachgeholt.

Zur Verschiebung des closed orbits um 15 mm sind die in Tabelle 5.1 aufgeführten Kickerstärken notwendig.

Tabelle 5.1: Stärken der Kicker zur Erzeugung einer "closed - orbit" Verschiebung von 15 mm .

Kicker:	Ki 1	Ki 2	Ki 3	Ki 4
Stärken (mrad)	2,58	1,98	1,98	2,25

Wichtig für den Injektionsprozess ist die Akzeptanz des Speicherringes, die durch den minimalen Wert des Ausdruckes ( $E_i^2/\beta_i$ ) im gesamten Ring gegeben ist. Mit einer maximalen Apertur in der Vakuumkammer im Quadrupol QD2 von  $\pm 35$  mm und der  $\beta_x$  - Funktion an diesem Ort von  $\beta_x = 19$  m/rad ergibt sich eine Akzeptanz in der x - Richtung von  $A_x = 64 \pi$  mm mrad. Die mit dieser Akzeptanz berechnete Phasenellipse am Ort der Injektion mit  $\beta_x = 12$  m/rad und  $\alpha_x = 0$  ist in Abb. 5.2 dargestellt. Nach Abb. 5.2 steht am Ort der Injektion eine Apertur in x - Richtung von  $\pm 27,5$  mm und  $\pm 2,3$  mrad zur Verfügung. Die Dicke der Septumsschiene wurde zu 1 mm gewählt und diese ist 32 - 33 mm vom Sollorbit entfernt angebracht.

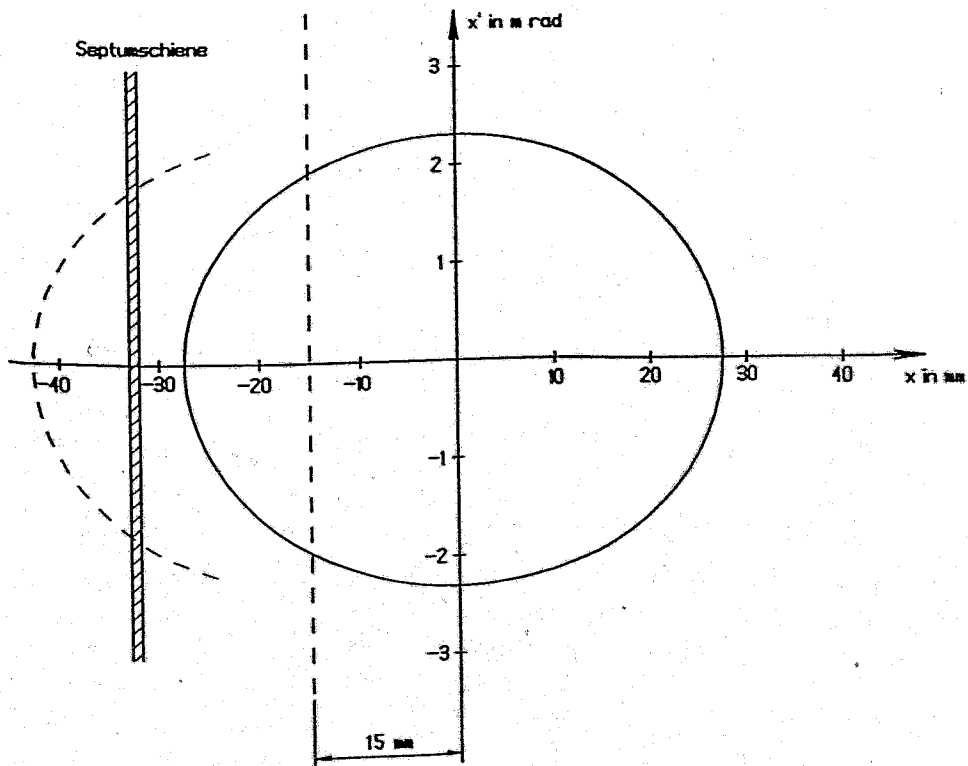


Abb. 5.2: Phasenellipse des Speicherringes ROSY am Injektionspunkt und Ort der Septumsschiene. Gestrichelt: Phasenellipse bei einer Verschiebung des closed orbits um 15 mm.

## 5 Injektion

### 5.1 Injektionsprozess

Die Speicherung des vom Booster - Synchrotron über den Transferweg kommenden Elektronenstrahles ist nur mit einem Septum als Injektionsmagnet und weiteren Kickern möglich. Die Kicker verschieben zeitlich die Apertur des Speicherringes über die Septumsschiene, um den injizierten Strahl zu speichern und den bereits gespeicherten Strahl nicht zu verlieren.

Der Injektionsprozess und damit die verbundene Verschiebung des "closed - orbits" soll möglichst lokal sein, d.h. auf einem kleinen Bereich des Speicherringumfanges durchgeführt werden. In vielen Speicherringen der 3. Generation wird die Injektion mit 4 Kickern und in dem Bereich durchgeführt, in dem die Dispersionsfunktion null ist (lange gerade Stücke). Bei ROSY ist ebenfalls vorgesehen, 4 Kicker zu verwenden, doch die Injektion soll in einem Bogen des Achromaten, d.h. in Bereichen, in denen die Dispersionsfunktion nicht null ist, durchgeführt werden. Die Bereiche  $\eta_x = 0$  sollen ausschließlich dem Einbau von Wiggeln und Undulatoren vorbehalten bleiben.

Die Anordnung der Kicker im Achromaten und die von diesen Kickern durchgeführte "closed - orbit" - Verschiebung sind in Abb. 5.1 wiedergegeben.

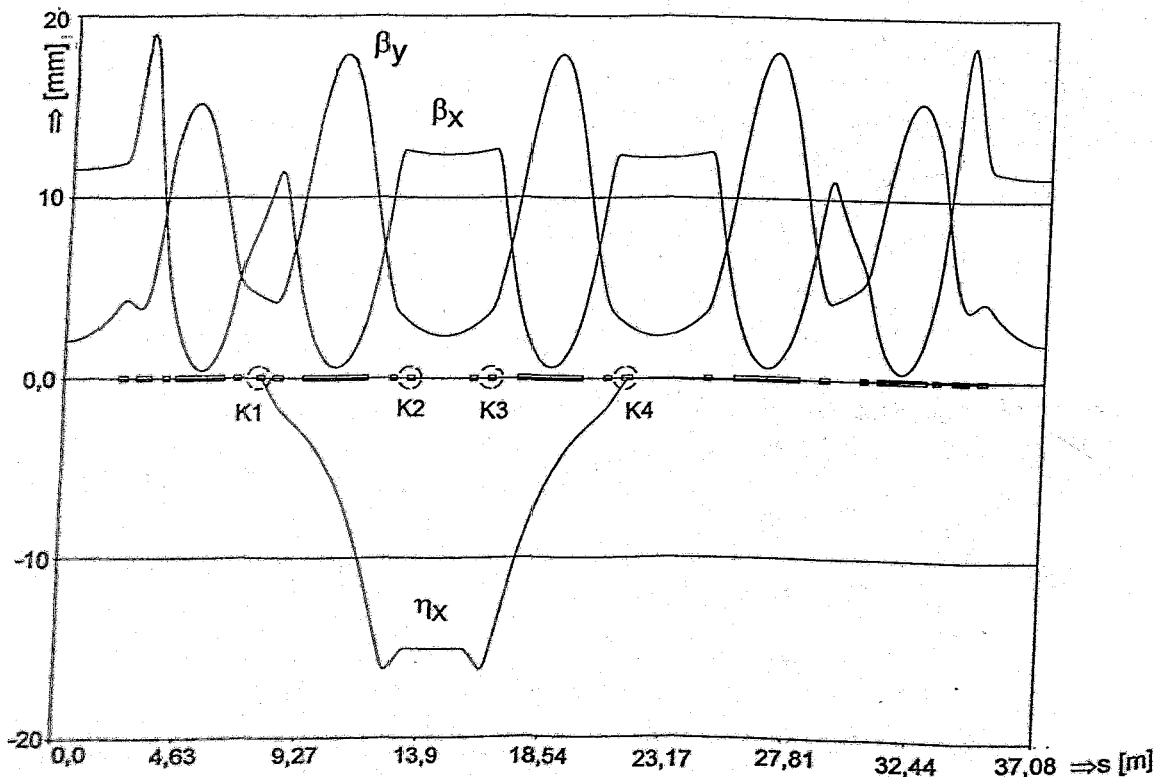


Abb. 5.1: Anordnung der Kicker im Achromaten von ROSY und "closed - orbit"-Verschiebung durch die Kicker.

Mit einer Emittanz des injizierten Strahles von  $\varepsilon_x = 0,161 \pi \text{ mm mrad}$ , einer relativen Energieunschärfe von  $\sigma_E/E = 1,1E-03$  und der Anpassung der Betatronfunktionen ergeben sich folgende Querschnitte und Divergenzen am Injektionspunkt:  $\sigma_x = 1,4 \text{ mm}$ ,  $\sigma'_x = 0,12 \text{ mrad}$ ,  $\sigma_y = 0,22 \text{ mm}$  und  $\sigma'_y = 0,035 \text{ mrad}$ . Wird die Akzeptanz durch die Kicker über die Septumsschiene bewegt (siehe Abb. 5.2, gestrichelte Kurve), so ist für die Divergenz des Strahles genügend Raum vorhanden und die Injektion kann auch "nicht angepaßt" durchgeführt werden, d.h. mit einem möglichst kleinen Strahlquerschnitt.

Der Injektionsprozeß soll über etwa 5 Umläufe durchgeführt werden. Unter der Annahme, daß die Kickerpulse einen sinusförmigen Verlauf haben, ergibt sich somit eine Länge des Pulses (halbe Sinuswelle) von  $2 \mu\text{s}$ . Der zeitliche Verlauf der Kickerpulse ist in relativen Einheiten in Abb. 5.3 dargestellt.

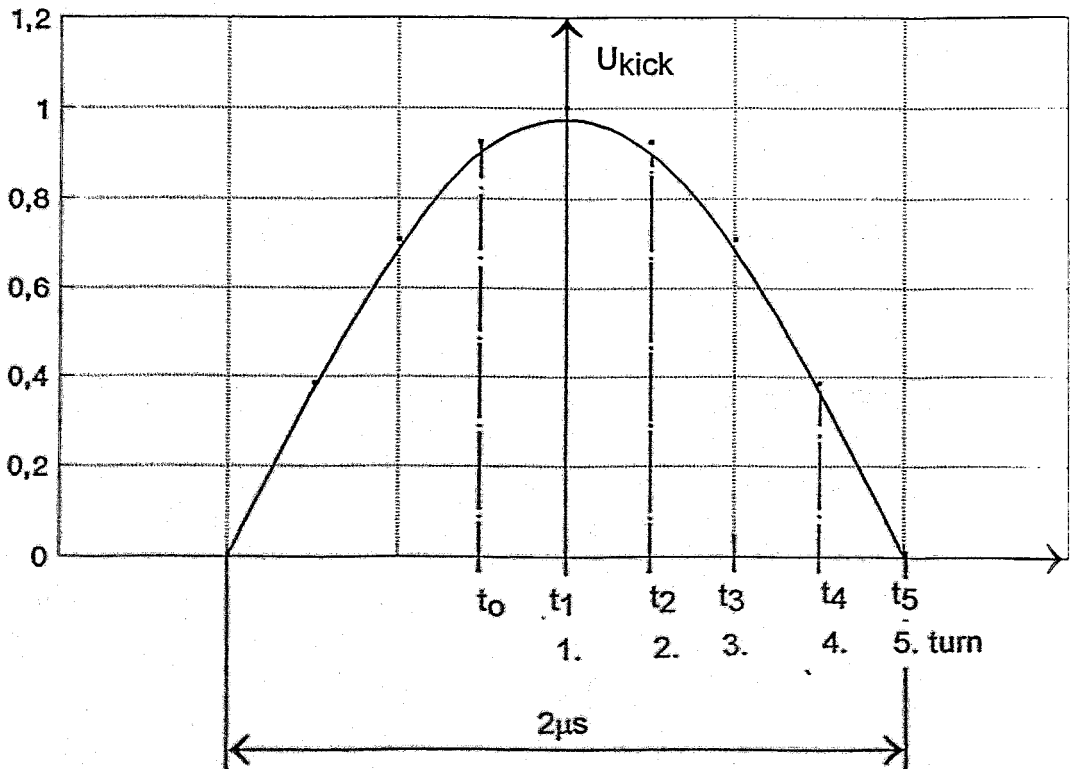


Abb. 5.3: Zeitlicher Verlauf der Kickerpulse für den Injektionsprozess.

Zur Überprüfung einer erfolgreichen Injektion wurde der Elektronenstrahl vom Booster - Synchrotron mit einer Ablage von 34 mm vom Sollorbit injiziert und die Ablage des Strahles in den ersten 7 Umläufen berechnet. Die Kicker machten dabei eine closed-orbit - Verschiebung von 15 mm und es wurde zum Zeitpunkt  $t_0$  injiziert ( siehe Abb.5.3). Die Amplituden und Steigungen der Betatronschwingungen sind in der Phasenellipse (siehe Abb.5.4 ) wiedergegeben (kleine offenen Kreise). Nach dem ersten Umlauf beträgt die Amplitude des Strahles etwa 28 mm und die Steigung  $-1,4$  mrad. Wegen der Injektion zum Zeitpunkt  $t_0$  hat sich die Phasenellipse noch nicht verschoben und der Strahl geht nicht verloren. Die Amplituden und Steigungen nach den nächsten Umläufen sind ebenfalls in Abb. 5.4 eingetragen.

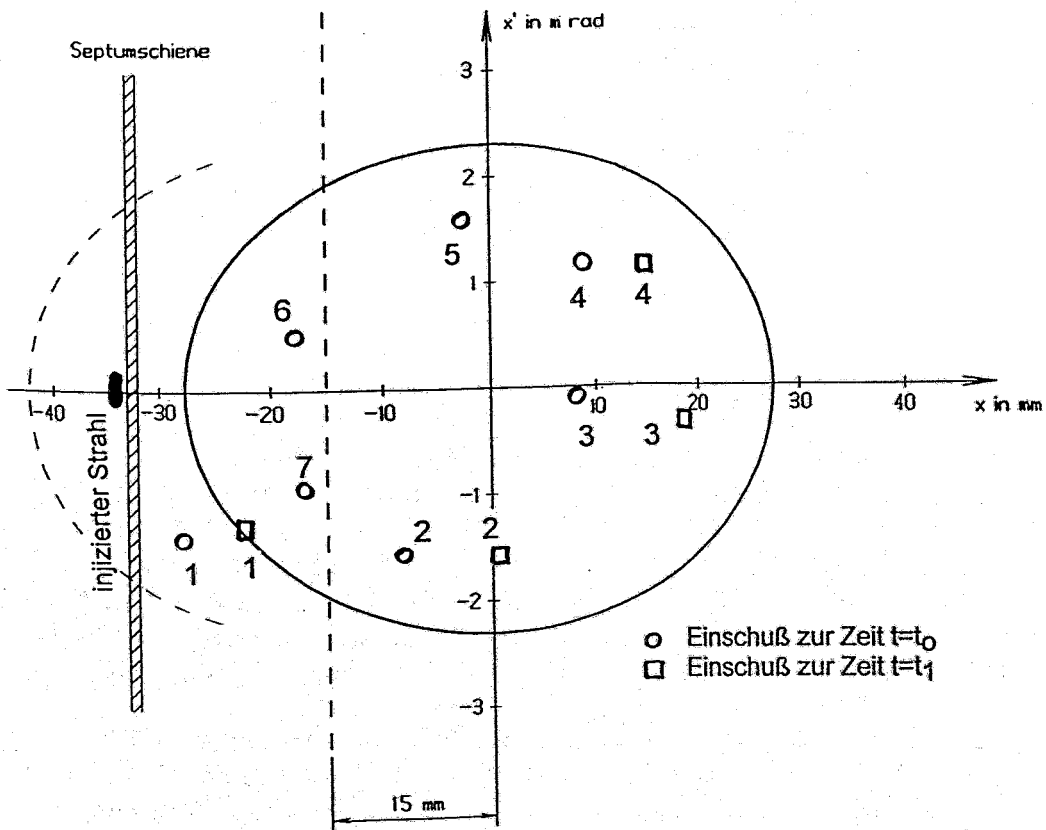


Abb. 5.4: Phasenellipse am Ort der Injektion mit den Ablagen und Steigungen der Betatronschwingungen nach den verschiedenen Umläufen. Offenen Kreise: Injektion zum Zeitpunkt  $T = t_0$ , Offene Quadrate: Injektion zum Zeitpunkt  $t = t_1$ .

Nach Abschluß der Injektion läuft der Elektronenstrahl im Speicherring mit einer Amplitude von etwa 24 mm um. Bei einer Injektionsenergie von 800 MeV wird diese Amplitude mit einer Zeitkonstanten von  $t = 125$  ms gedämpft. D.h. bis zur nächsten Injektion ist die Amplitude bis auf etwa 12 mm abgeklungen.

In Abb. 5.4 sind auch die Verhältnisse dargestellt, die sich bei einer Injektion zum Zeitpunkt  $t = t_1$  ergeben. In diesem Falle wurde der injizierte Strahl nur über 4 Umläufe verfolgt. Für den ersten Umlauf ergibt sich in diesem Falle ein größerer Abstand zur Septumsschiene. Die Amplitude des injizierten Strahles nach Ablauf der Injektion beträgt in diesen Falle etwa 22 mm, d.h. sie ist gleich groß wie bei der Injektion zum Zeitpunkt  $t = t_0$ . Für die Injektion wurden die in Tabelle 5.2 zusammengetellten Daten festgelegt.

Tabelle 5.2: Parameter für die Injektion

Injektionspunkt	- 34 mm
Dicke der Septumsschiene	2 - 3 mm
Lage der Septumsschiene	- ( 31 - 33 ) mm
Sollorbitverschiebung	15 mm
Stärke Kicker 1	2,58 mrad
Stärke Kicker 2	1,98 mrad
Stärke Kicker 3	1,98 mrad
Stärke Kicker 4	2,25 mrad
Länge des Kickerpulses	2,0 $\mu$ s

## 5.2 Aufbau der Kicker

Alle 4 Kicker werden trotz ihrer unterschiedlichen Stärke identisch aufgebaut. Der eigentliche Kickermagnet ist außerhalb der Vakuumkammer angebracht. Die Vakuumkammer selbst ist aus Keramik gefertigt und wird mit einer dünnen (  $1\mu$ m ) Schicht Titan bedampft, damit die Wandströme durch die Kammer fließen können. Der elektrische Kontakt zwischen der dünnen Titanschicht und den metallischen Vakuumflanschen wird durch spezielle Berylliumkontakte hergestellt.

Das Rückflußjoch kann wahlweise aus NiZn - Ferrit oder ferromagnetischen Lamellen ( 0,1 mm dicken orientierten Siliziumkristallen oder 0,1 mm dickem Permalloy - Kohlenstoff ) hergestellt werden. Das Rückflußjoch wird zweigeteilt, um Zugang zu der Vakuumkammer zu haben. Die Apertur im Kicker ist  $100 * 54 \text{ mm}^2$ . Weitere Einzelheiten können den Abb. 5.5 und 5.6 entnommen werden, die den Aufbau der Kicker wiedergeben.

Die Parameter der Kicker sind in Tabelle 5.3 zusammengefaßt und in Abb. 5.7 ist das Prinzipschaltbild des Kickerpulsers wiedergegeben.



Tabelle 5.3: Parameter der Kicker

Injektionsenergie	800 MeV
Ablenkung (Stärke)	2,58 - 1,98 - 1,98 und 2,25 mrad
Max. magn. Flußdichte (2.58 mrad)	0,048 T
Magnetische Länge	150 mm
Physikalische Länge	200 mm
Aufbau des Magneten	Ferrit oder 0,1mm Eisen
Apertur	100 mm Horiz. * 54 mm Vertikal
Maximaler Strom	2057 A
Pulsform	halbe Sinuswelle
Pulsdauer	2 $\mu$ s
Induktivität	0,4 $\mu$ H
Induktivität des Schaltkreises	1,0 $\mu$ H
Kapazität des Schaltkreises	400 nF
Maximale Spannung	3,3 kV

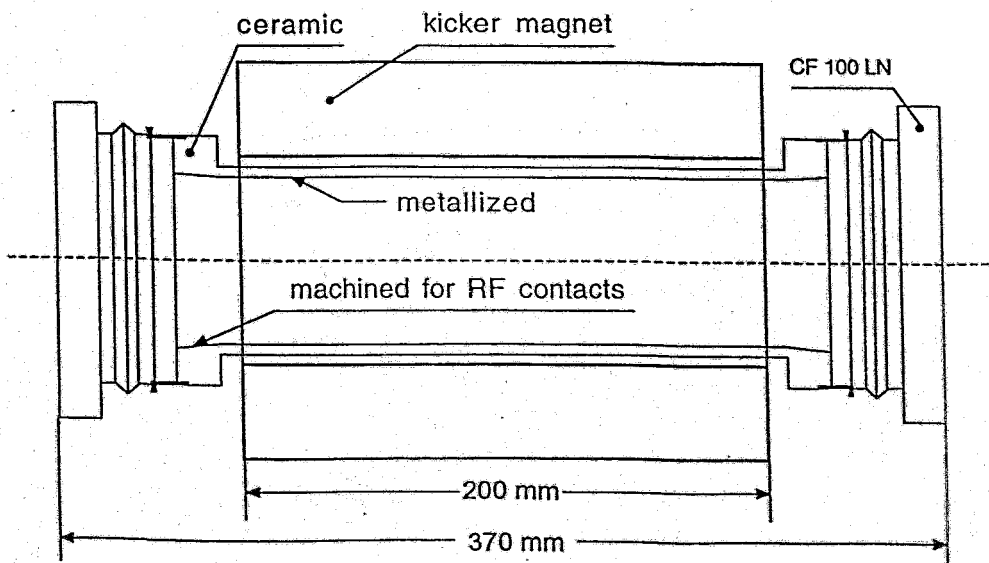


Abb. 5.5: Kickermagnet mit der keramischen Vakuumkammer

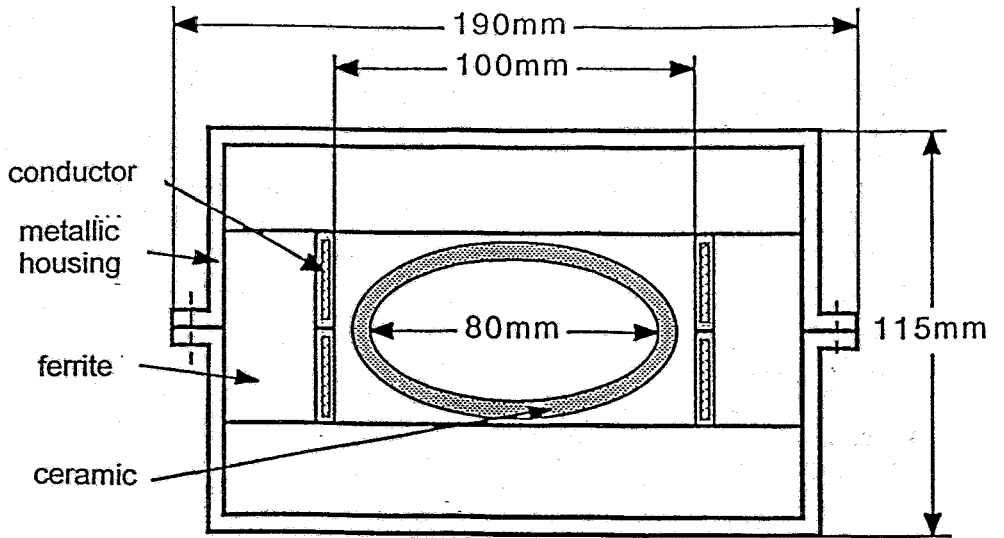


Abb. 5.6: Querschnitt durch den Kickermagnet mit der keramischen Vakuumkammer

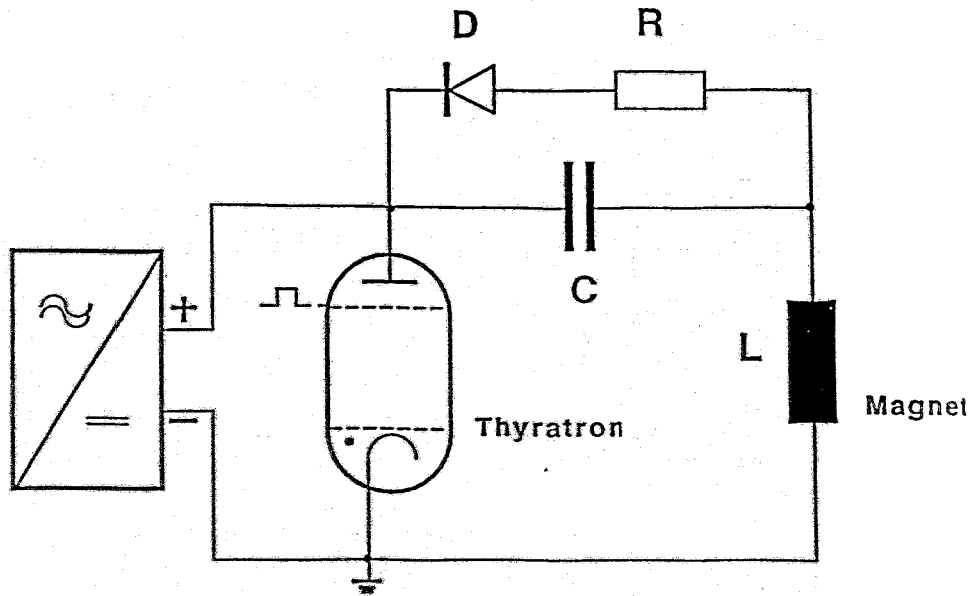


Abb. 5.7: Aufbau des Pulsers für die Kicker

### 5.3 Aufbau des Septums

Die gewünschte Ablenkung von 15 Grad kann durch ein einzelnes Septum mit einer physikalischen Länge von etwa 1m durchgeführt werden. Die Abbildungen 5.8 und 5.9 geben den Aufbau des Septums wieder. Das Septum wird mit einer Wirbelstromabschirmung versehen, um die magnetischen Felder außerhalb des Septums kleiner als 1 mT m zu halten. Das Rückflusjoch wird aus kommerziell erhältlichen, 0,2 mm dicken Lamellen aufgebaut. Diese sind zwecks Vakuumisolation mit Carlite beschichtet. Die Isolation zwischen den Leitern und dem Metallgehäuse wird mit Keramik durchgeführt. Weitere Einzelheiten zum Aufbau des Septums sind den Abb. 5.8 und 5.9 zu entnehmen.

Tabelle 5.5: Parameter des Septums

Injektionsenergie	800 MeV
Ablenkung	15 Grad
Max. magn. Flußdichte (2.58 mrad)	0,73 T
Eisenlänge	950 mm
Magnetische Länge	961 mm
Physikalische Länge	990 mm
Ablenkradius	3,6705 m
Aufbau des Magneten	0,2 mm Eisen lamelliert
Apertur	40 mm Horiz. * 12 mm Vertikal
Form des Magneten	gekrümmt
Maximaler Strom	6924 A
Pulsdauer	70 $\mu$ s
Induktivität des Schaltkreises	5,5 $\mu$ H
Kapazität des Schaltkreises	90 $\mu$ F
Maximale Spannung	1,7 kV

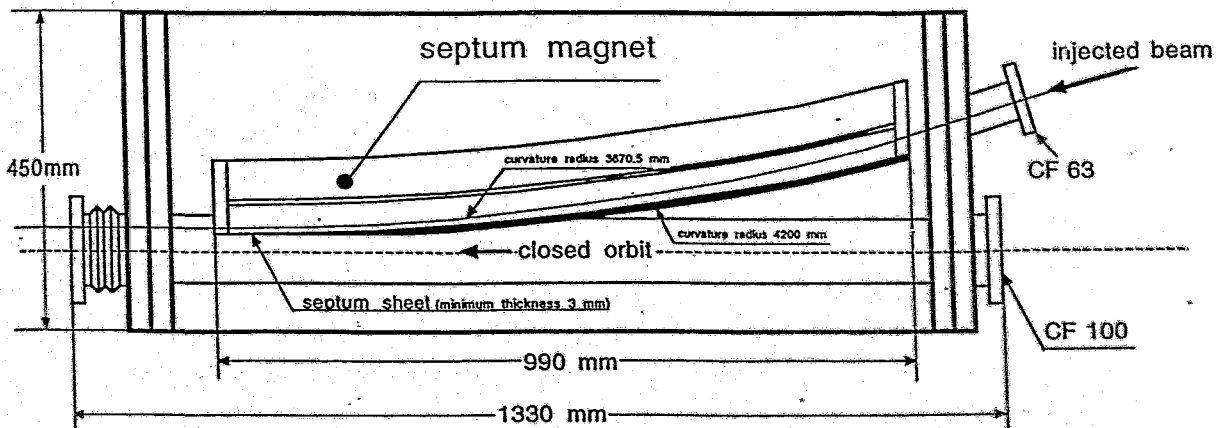


Abb. 5.8: Querschnittszeichnung des Septums

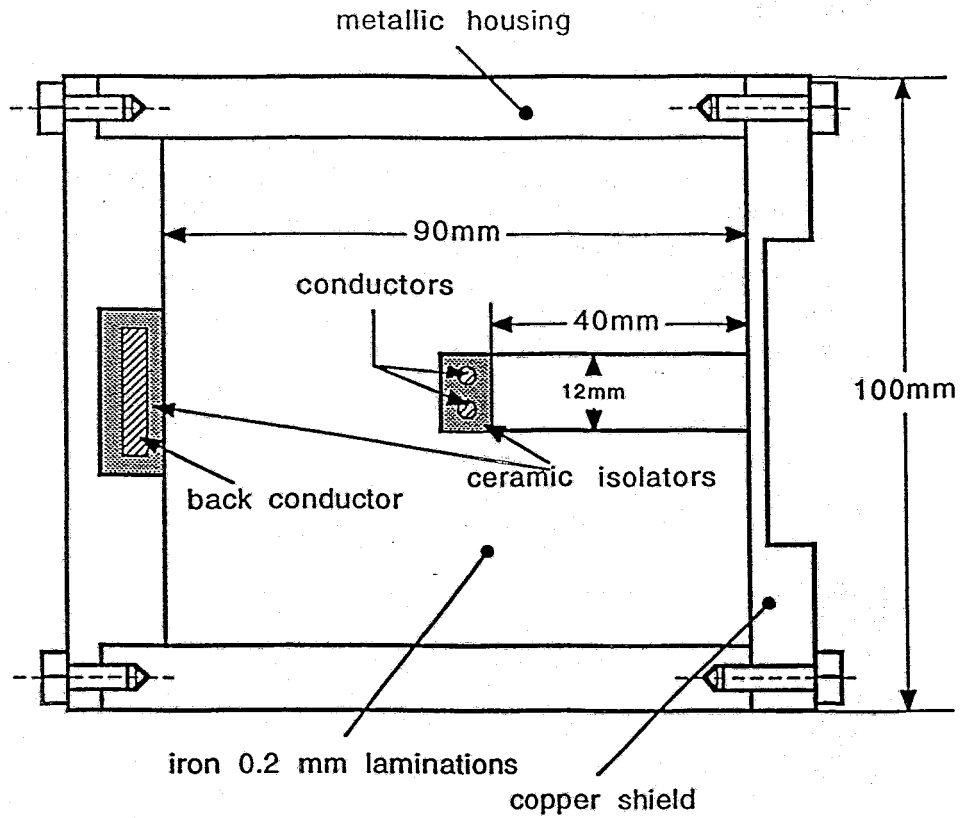


Abb. 5.9: Schematische Darstellung des Septummagneten

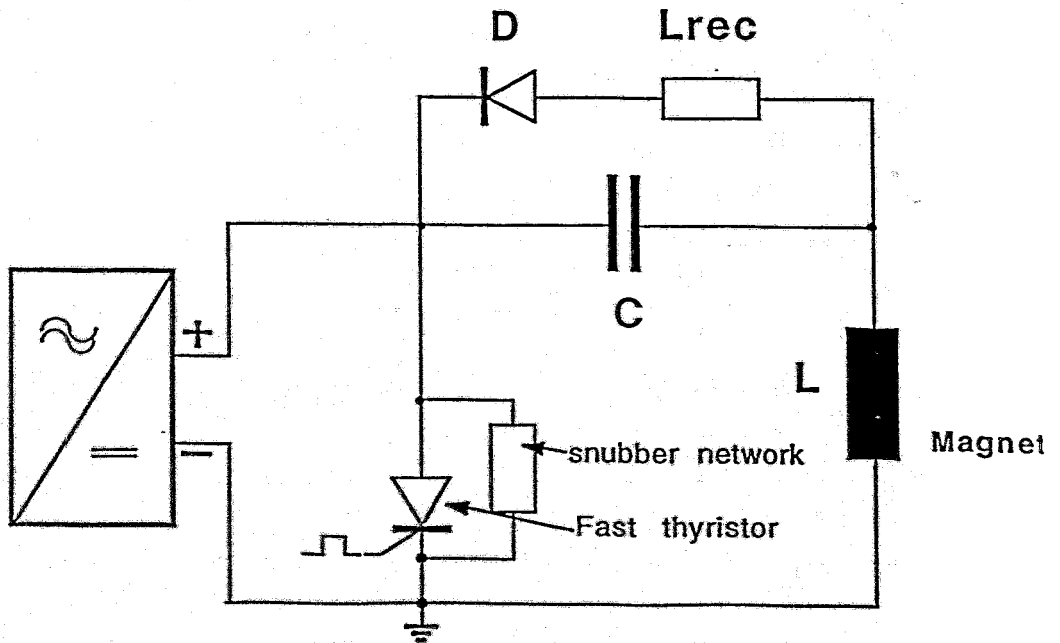


Abb. 5.10: Prinzipschaltbild für den Pulser des Septums.

## 6 Magnete

### 6.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zum Entwurf der Ablenkmagnete, der Quadrupole, der Sextupole und der Korrekturmagnete für den Rossendorfer Speicherring ROSY dargestellt.

ROSY wird als Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation ausgelegt. Die wesentlichen Maschinenparameter sind: Elektronenenergie - 3 GeV, kritische Wellenlänge des Lichtspektrums - 0,15 nm, Emittanz des Elektronenstrahls  $\leq 30$  nm rad und Maschinenumfang - 148,1 m [Ei 92a,93a].

Die ROSY-Ablenkmagneten besitzen neben dem für die Strahlablenkung notwendigen homogenen Feld einen Quadrupolfeldanteil zur Vertikalfokussierung. Diese Magneten tragen wesentlich zur Kompaktheit der Maschine bei und leisten einen Beitrag zur kleinen Emittanz dieser Synchrotronstrahlungsquelle. Zur weiteren Fokussierung werden diskrete Quadrupole und für Chromatizitätskorrekturen werden Sextupole eingesetzt. In einem ersten Entwurf war vorgesehen, Sextupole mit überlagerten Steererfunktionen zu verwenden. Davon wurde abgegangen, und es kommen diskrete Korrekturmagnete zum Einsatz.

Die Entwicklungsziele der ROSY-Magnete sind in der folgenden Tabelle 6.1 dargestellt.

Tab. 6.1: Entwicklungsziele der ROSY-Magnete

Ablenkmagnete	Quadrupole	Sextupole
Ablenkwinkel/Anzahl : 15°/8, 20°/12	QP-Länge/Anzahl : 0,28/24, 0,4/24, 0,6/8	SP-Länge/Anzahl : 0,1/56
Sollbahnradius: 7,148 m	Maximaler Gradient: 20 T/m	Diff. Gradient: 500 T/m <sup>2</sup>
Flußdichte auf der Sollbahn: 0,373 T bei E=800 MeV 1,400 T bei E=3 GeV	Quadrupolstärke: 2 m <sup>-2</sup>	SP-Stärke: 50 m <sup>-3</sup>
Spalthöhe an der Sollbahn: 5,2 cm		
Gradient an der Sollbahn: 2,828 T/m		

Im Rahmen des rechnergestützten Magnetfeldentwurfs wurden die geforderten magnetischen Eigenschaften für die drei Magnettypen erfüllt. Erschwerend für den Entwurf erwies sich der für den Ring vorgesehene Rampbetrieb zwischen

der Injektionsenergie von 800 MeV und der Nominalenergie von 3 GeV, denn im oberen Energiebereich bei Flußdichten über 1,25 T beginnt die Sättigung des Eisens. Das hat z.B. für die Ablenkmagneten zur Folge, daß sich im Bereich oberhalb von 1,25 T die fokussierende Komponente etwas schneller verändert als die ablenkende (s. Abschnitt 2.2.5).

Der erreichte Stand des Magnetfeldentwurfs für die ROSY-Magnete wurde mittels POISSON-Rechnungen [PO 87] erarbeitet und stützt sich auf die Laborberichte [Ei 92b] und [Ei 93b].

Die verwendeten Programme gestatten die Lösung zweidimensionaler Probleme, d.h. im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden Feldgrößen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Strahls bestimmt. Der Einfluß der Änderung des Feldes in Strahlrichtung hat einige geringfügige Auswirkungen auf die Feldgrößen:

1. Die Krümmung des ROSY-Ablenkmagneten führt zu einer quadratischen Änderung der Horizontalkomponente, die einen Sextupolanteil erzeugt, der jedoch allgemein vernachlässigt wird [Wa 91].
2. Der Einfluß des Streufelds an den Ein- und Austrittskanten der magnetischen Elemente bewirkt eine effektive Verlängerung dieser Elemente [Ei 92b].
3. Schließlich ist das Verhalten der Ablenkmagnete in x- und y-Richtung nicht identisch.

Der Einfluß der Randfelder und das Verhalten der Ablenkmagnete außerhalb der Mittelebene können in weiterführenden Arbeiten untersucht werden.

## 6.2 Ablenkmagnete

Ablenkmagnete mit überlagertem Quadrupolfeld findet man bereits bei den Synchrotronstrahlungsquellen ELETTRA [EL 89] und ALS [AL 86]. Die Grundparameter der Ablenkmagnete von ELETTRA, ALS und ROSY sind in Tabelle 6.2 zusammengestellt.

Tab. 6.2: Vergleich von Grundparametern für Ablenkmagnete

	ALS	ELETTRA	ROSY
e-Energie [GeV]	1,9	2,0	3,0
Ablenkwinkel [°]	10	15	15, 20
Bo [T]	1,58	1,212	1,4
Gradient [T/m]	6,3	2,86	2,83
Luftspalt [cm]	5	7	5,2

Die erfolgreiche Inbetriebnahme der Speicherringe ALS [Ja 93] und ELETTRA [Wr 93] zeigt die unproblematische Verwendung eines "combined function" Magneten. Die beim Ablenkmagnet für ROSY geforderten Gradienten stimmen fast mit denen für ELETTRA überein, und somit wurde beim Entwurf der ROSY-Ablenkmagnete von den ELETTRA-Magneten ausgegangen. Der Entwurf für ROSY wurde jedoch in zwei Punkten geändert :

1. Bei der ALS beträgt die magnetische Flußdichte auf dem Orbit 1,58 T und der Gradient 6,33 T/m. Bei einem so hohen Feld ist der Einfluß der Sättigung nicht mehr zu vernachlässigen und der Quotient  $G/B$  ändert sich im gesamte Bereich der Erregung. Das bewirkt ein anderes magnetisches Verhalten der Maschine.  
Weiterhin verändert sich mit dem Einsetzen der Sättigung die Sextupolkomponente. Die Rechnungen zeigen, daß diese Änderung beim Ablenkmagneten der ALS größer ist als bei ELETTRA.  
Um die Sättigungseffekte einzugrenzen und trotzdem eine kompakte Maschine zu bauen, wurde die magnetische Flußdichte auf dem Orbit im Gegensatz zu ELETTRA zu  $B_0=1,4$  T festgelegt. Bei einer Energie von 3 GeV ergibt sich somit ein Ablenkradius von 7,14771 m.
2. Das Gap des ELETTRA-Ablenkmagneten ist mit  $g=70$  mm sehr hoch. Die Gaphöhe bestimmt wesentlich die Betriebskosten und wurde entsprechend der Vakuumkammer auf 52 mm reduziert. Mit der Verringerung des Gaps konnte auch die Gesamthöhe des Magneten verkleinert werden.

In Abb. 6.1 ist der Schnitt durch diesen ROSY-Ablenkmagnet dargestellt. Die Betriebsdaten Flußdichte und zur Erregung notwendige Amperewindungszahl für die Injektionsenergie 800 MeV und die Nominalenergie 3 GeV sind in der folgenden Tabelle 6.3 zusammengefaßt.

Tab. 6.3: Wertebereich der Energie, der magnetischen Flußdichte und der Erregung in dem die ROSY-Ablenkmagnete betrieben werden

E [GeV]	$B_0$ [T]	I [AWdg]
0,8	0,3733	7791
3,0	1,40	30740

Entsprechend den Veränderungen von Gaphöhe und Gradient mußte das Polprofil des Ablenkmagneten neu berechnet werden. Dies kann näherungsweise mit den Berechnungen für Quadrupole geschehen. Abbildung 6.2 zeigt einen Ablenkmagnet mit Quadrupolanteil mit den zur Berechnung benötigten Größen.





Für eine hyperbolische Polform des Quadrupols gemäß :

$$Y = \frac{1}{2} R_0^2 \frac{1}{X}$$

ist  $2R_0$  die Quadrupolapertur. Somit ist die halbe Gaphöhe (s. Abb. 6.2)

$$h_0 = \frac{1}{2} R_0^2 \frac{1}{X_0} \quad (6.1)$$

Wobei  $X_0$  der Abstand der Sollbahn vom Quadrupolmittelpunkt ist. Der Gradient dieses Quadrupols ist :

$$G = \frac{dB_y}{dx} = \frac{dB_x}{dy} \quad \text{und der Gradient am Sollkreis ist damit} \quad (6.2)$$

$$G_0 = \frac{By_0}{X_0} \quad (6.3)$$

Die Gaphöhe verändert sich im Abstand  $s$  von  $X_0$  gemäß Gleichung 6.1

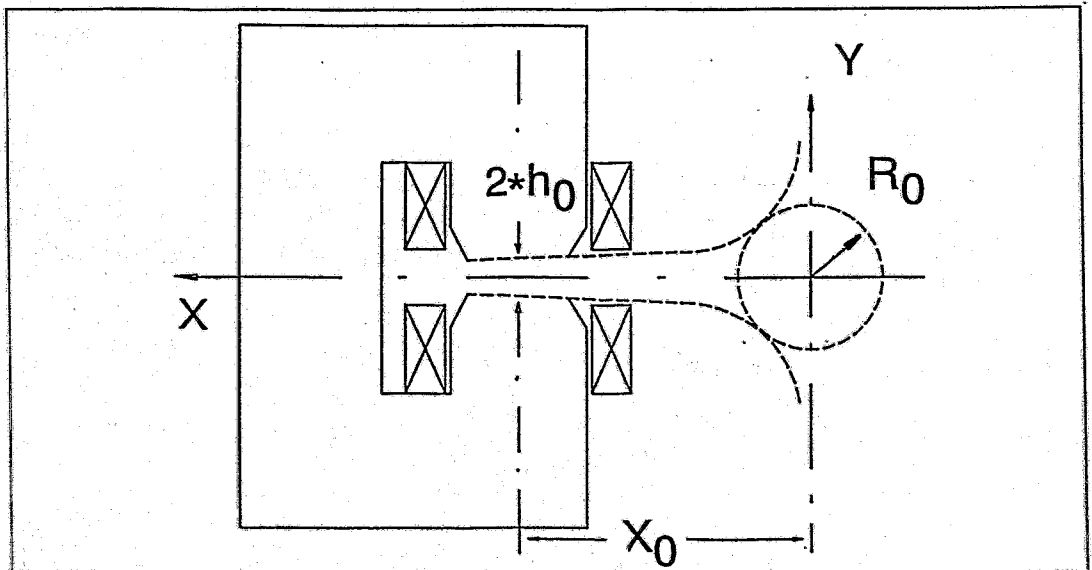


Abb. 6.2 Ablenkmagnet mit Quadrupolanteil

$$h(s) = \frac{1}{2} R_0^2 \frac{1}{X_0 \pm s}$$

Ersetzt man  $R_0$  unter Verwendung von Gleichung (6.1), erhält man

$$h(s) = \frac{h_0 X_0}{X_0 \pm s}$$

und schließlich mit Gleichung (6.3) die Höhe des Gaps zu

$$h(s) = \frac{h_0}{1 \pm s \frac{G_0}{B_{y0}}} \quad (6.4)$$

Nachdem Flußdichte und Gradient auf dem Sollkreis gemäß Tabelle 6.2 zu  $B_{y0}=1,4$  T und  $G_0=2,83$  T/m festgelegt wurden, konnte mit Formel (6.4) ein Grobentwurf für die Polschuhform der Ablenkmagnete durchgeführt werden. Die Bestimmung der tatsächlich notwendigen Erregung unter Berücksichtigung von Streuverlusten und Sättigung erforderten den Einsatz des erwähnten Rechenprogramms. Wie üblich (s. z.B. [An 87], [Ty 91]), wurde die Stabilisierung von Feldeigenschaften in einer "good field region" durch Shimierung des Magnetfelds an den Feldrändern erreicht. Dabei beinhaltet die good field region Gebiete in denen die Abweichung der Flußdichte vom Orbitwert  $5 \cdot 10^{-4}$  T nicht überschreitet.

In einer ausgedehnten Iterationsprozedur, die neben der stückweisen Veränderung der Shims auch die Untersuchung des Einflusses der Polbreite und des Polkonuswinkels einbezog, wurde rechnerisch eine Kontur der Polschuhe gefunden, die den genannten Anforderungen an eine good field region genügt.

Der Grundgedanke dieses Magnetfeldentwurfs beruht darauf, die errechnete Verteilung der y-Komponente der Flußdichte  $B_y(x)$  in der Mittelebene des Ablenkmagneten nach ihrem Dipol-, Quadrupol- und Sextupolanteil zu beurteilen:

$$B_y(x) = B_{y0} + G_0(x - x_0) + S_0(x - x_0)^2$$

wobei

$$B_{y0}, G_0 = \left. \frac{dB_y}{dx} \right|_{x_0} \quad \text{und} \quad S_0 = \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 B_y}{dx^2} \right|_{x_0}$$

den Dipol-, den Quadrupol- und den Sextupolanteil bedeuten.

POISSON gestattet die Bestimmung der Flußdichte  $B_{y_i}$  an unterschiedlichen Stützstellen  $x_i$  sowie eines Gradienten  $G_{x_i} = (B_{x_i} - B_{x_{i+1}}) / (x_i - x_{i+1})$ . Dieser Gradient wird nicht verwendet. Vielmehr wird hier abweichend ein Gradient im Verhältnis zur Abweichung vom Sollorbit betrachtet

$$G_x = [B_y(x) - B_{y0}] / (x - x_0) \quad (6.5)$$

der für die Beschreibung von combined function Magneten von Interesse ist. Für  $x \rightarrow x_0$  erhält man für den Grenzwert dieses Gradienten  $G_x \rightarrow G_0$ . Gewünscht wird für diesen Ablenkmagneten folgender Verlauf der Flußdichte:

$$B_y = B_{y0} + G_0(x - x_0)$$

während der reale Verlauf angenähert wurde durch (s. Abb. 6.3)

$$B_y = B_{y0} + G_0(x - x_0) + \Delta B_y(x) \quad (6.6)$$

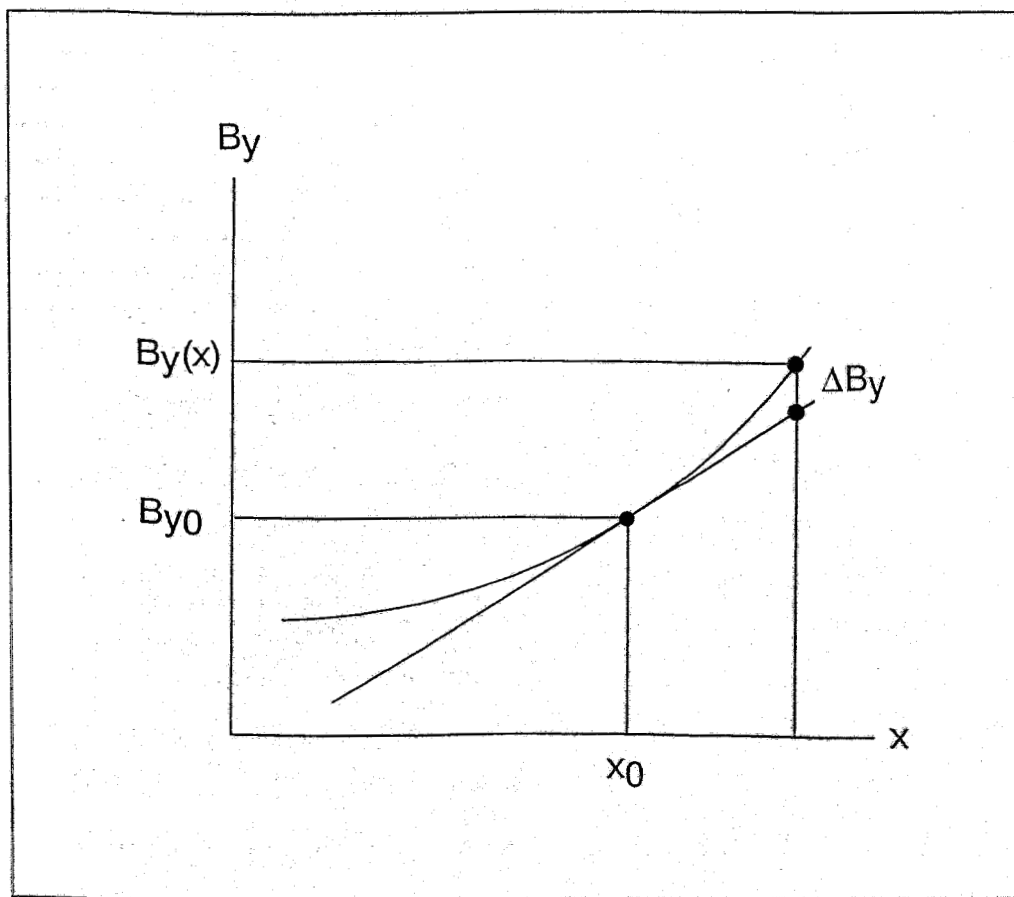


Abb. 6.3: Verlauf der magnetischen Flußdichte im Ablenkmagneten zur Erläuterung des Auswerteverfahrens der POISSON-Rechnungen

Ist  $\Delta B_y(x)$  nun durch eine Sextupolkomponente gegeben, dann läßt sich diese darstellen durch

$$\Delta B_y(x) = S_0(x - x_0)^2 = \frac{1}{2} \frac{d^2 B_y}{dx^2} (x - x_0)^2 = \frac{1}{2} g' (x - x_0)^2 \quad (6.7)$$

In der Iterationsprozedur wurden für die Polschuhkontur nur solche Veränderungen zugelassen, für die in der good field region die erlaubte Abweichung von der Orbitflußdichte  $5 \cdot 10^{-4}$  T nicht überschreitet und die Abweichung des Orbitgradienten und der Sextupolanteil minimiert werden.

Insgesamt wurden die Auswertungen für die in Tabelle 6.4 folgenden Erregungen durchgeführt:

Tab. 6.4: Erregung für eine Spule und Orbitwerte für Flußdichte und Gradient, für die die Auswertung durchgeführt wurde

Erregung [AWindungen]	$B_0$ [T]	$G_0$ [T/m]
5000	0,2396	- 0,4835
10345	0,4956	- 1,0000
15510	0,7415	- 1,4986
20690	0,98881	- 1,9936
25863	1,22746	- 2,4687
26897	1,27196	- 2,5538
28966	1,35086	- 2,6950
31035	1,41348	- 2,79410
35000	1,50743	- 2,92770

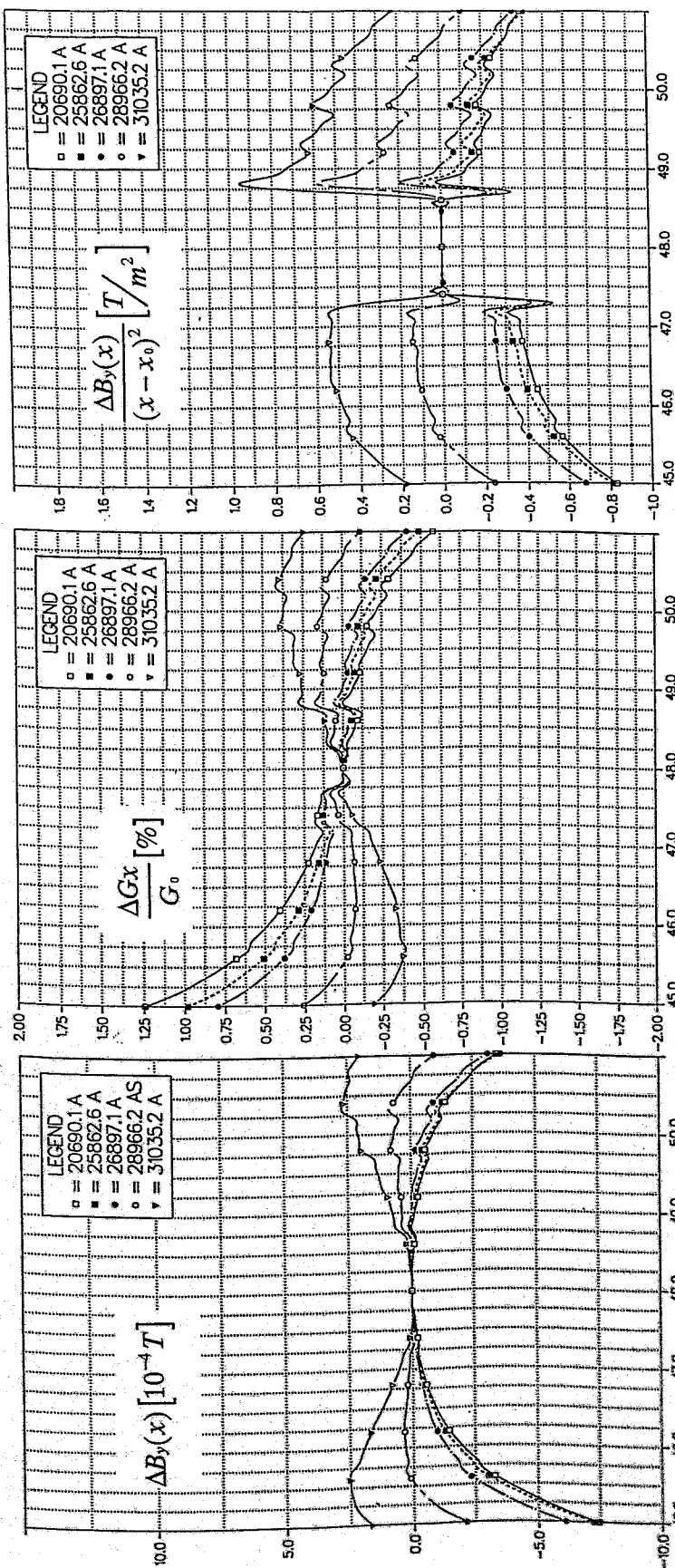
Die Ergebnisse der Optimierung sind in Tabelle 6.5 zusammengefaßt.

Tab. 6.5: Zusammengefaßte Optimierungsergebnisse zu den Ablenkmagneten

good field region x-, y-Richtung	$\pm 2,5$ cm
Abweichung der Flußdichte	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ T
relative Abweichung des Gradienten	$\leq 0,7$ %
Maximalwert der Sextupolkomponente	$\leq 1$ T/m <sup>2</sup>

In Abbildung 6.4 sind die Abweichungen von Flußdichte und Gradient auf dem Orbit  $\Delta B_y(x)$  und  $\frac{\Delta G_x}{G_0} = \frac{G_x - G_0}{G_0}$  sowie die absolute Größe des Sextupolmoments  $\frac{\Delta B_y(x)}{(x - x_0)^2}$  für den untersuchten Bereich der Erregung in

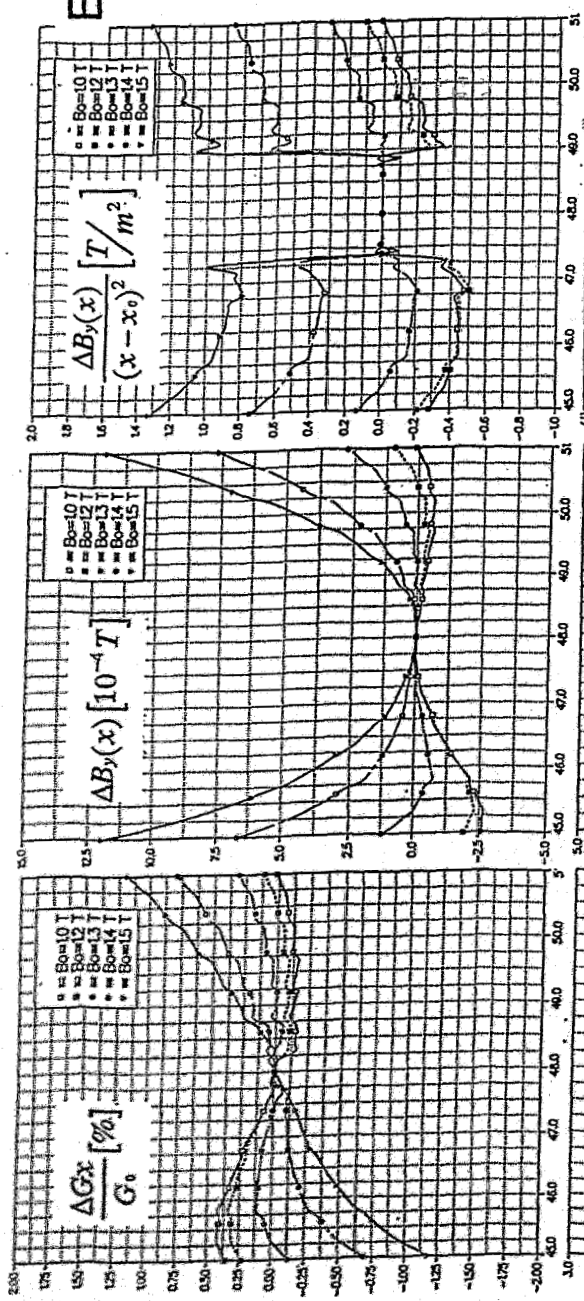
Abhängigkeit des Abstands von der Sollbahn dargestellt. Zum Vergleich mit den Ablenkmagneten von ELETTRA [To 93] und ALS [Ta 93] sind die entsprechenden Werte in Abb. 6.5 gegenübergestellt.



$x [cm]$

Abb. 6.4: Abweichung von Flußdichte und Gradient sowie Sextupolanteil für den ROSY-Ablenkmagnet

# ELETTRA



# ALS

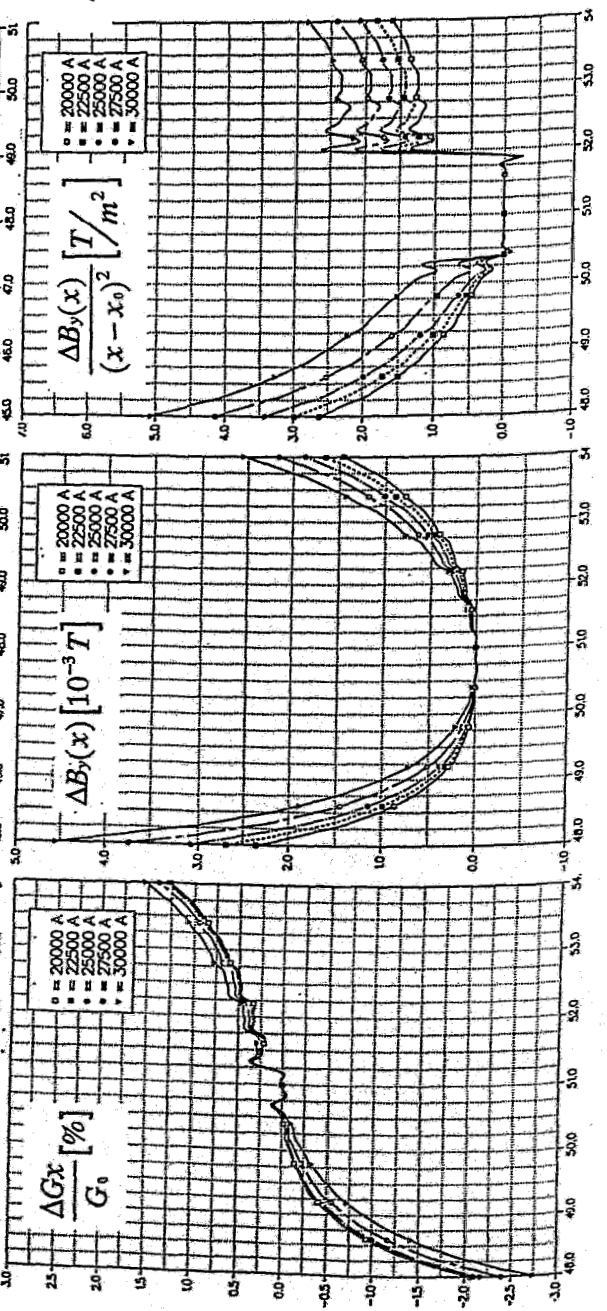


Abb. 6.5: Abweichung von Flußdichte und Gradient sowie Sextupolanteil für ALS- und ELETTRA-Ablenkmagnet

$x$  [cm]

Die Koordinaten für das Profil dieses optimierten Magneten entnimmt man dem POISSON-Input gemäß Tabelle 6.6.

Tab. 6.6: POISSON Eingabeliste für die optimierte Kontur des Ablenkmagneten

```
DIPOL/1.8.93/autkruS5
$REG NREG=4,DX=0.5,DY=0.5,XMAX=100.0,YMAX=44.5,
  KMAX=141,LMAX=92,LINX=0,LINY=0,ITRI=0,NPOINT=5$
$PO X= 0.0, Y= 0.0$
$PO X=70.0, Y= 0.0$
$PO X=70.0, Y=44.5$
$PO X= 0.0, Y=44.5$
$PO X= 0.0, Y= 0.0$
$REG MAT=2,NPOINT=28$
$PO X= 0.0, Y= 0.0$
$PO X=24.0, Y= 0.0$
$PO X=24.0, Y=21.0$
$PO X=36.0, Y=21.0$
$PO X=36.0, Y= 8.75$
$PO X=39.0, Y= 2.75$
$PO X=40.0, Y= 2.1$
$PO X=41.0, Y= 2.1$
$PO X=42.0, Y= 2.31891$
$PO X=43.0, Y= 2.36146$
$PO X=44.0, Y= 2.40560$
$PO X=45.0, Y= 2.45142$
$PO X=46.0, Y= 2.49902$
$PO X=47.0, Y= 2.54851$
$PO X=48.0, Y= 2.6$
$PO X=49.0, Y= 2.6536$
$PO X=50.0, Y= 2.70947$
$PO X=51.0, Y= 2.76774$
$PO X=52.0, Y= 2.82857$
$PO X=53.0, Y= 2.89213$
$PO X=54.0, Y= 2.95862$
$PO X=55.0, Y= 2.9$
$PO X=56.0, Y= 2.9$
$PO X=57.0, Y= 3.6$
$PO X=60.0, Y= 8.6$
$PO X=60.0, Y=44.5$
$PO X= 0.0, Y=44.5$
$PO X= 0.0, Y= 0.0$
$REG MAT=1,CUR=15517.6,NPOINT=5$
$PO X=28.0, Y= 5.0$
$PO X=35.0, Y= 5.0$
$PO X=35.0, Y=21.0$
$PO X=28.0, Y=21.0$
$PO X=28.0, Y= 5.0$
$REG MAT=1,CUR=-15517.6,NPOINT=5$
$PO X=61.0, Y= 5.0$
$PO X=68.0, Y= 5.0$
$PO X=68.0, Y=21.0$
$PO X=61.0, Y=21.0$
$PO X=61.0, Y= 5.0$
```

Die Kontur des optimierten ROSY-Ablenkmagneten sowie die Flußdichteverteilung im Eisen und im Luftspalt sind in Abbildung 6.6 dargestellt.

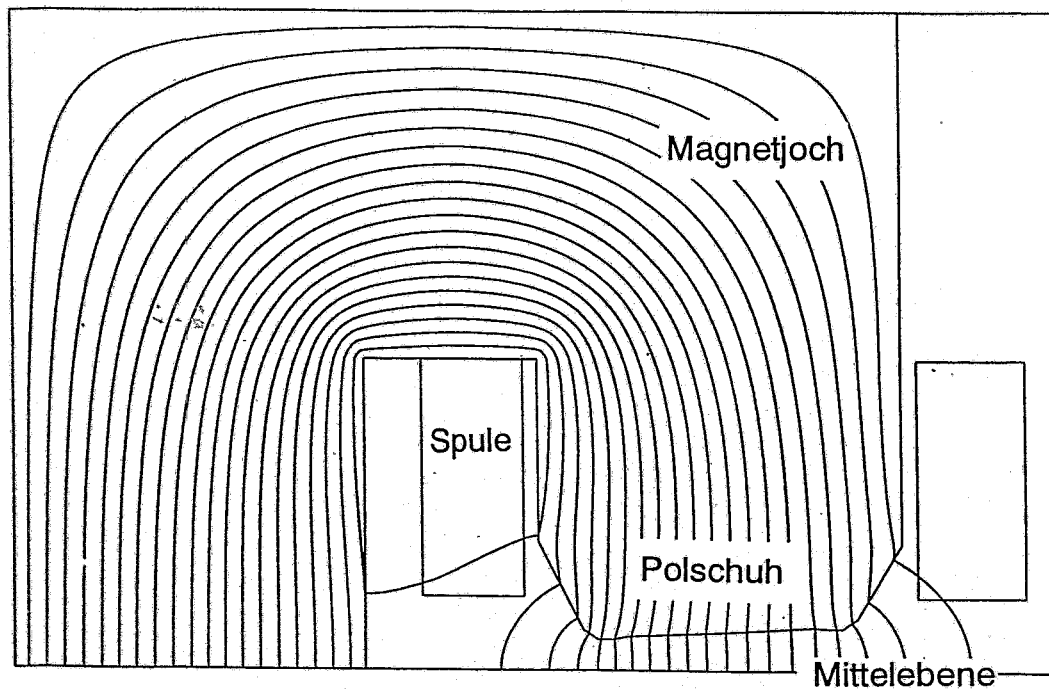


Abb. 6.6: Kontur und Flußlinien des ROSY-Ablenkmagneten

Das Polschuhprofil für den ROSY-Ablenkmagnet ist in der folgenden Abbildung 6.7 dargestellt.

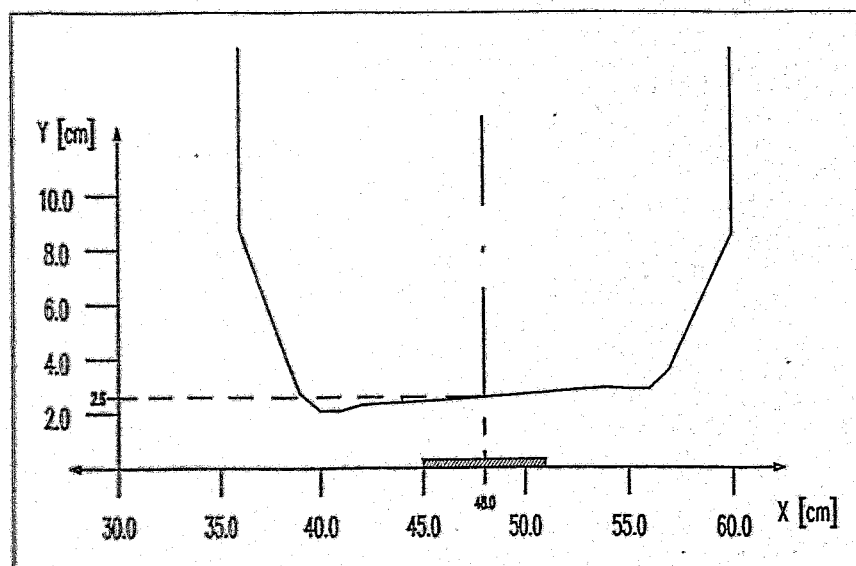


Abb. 6.7: Polschuhprofil des ROSY-Ablenkmagneten



Die Erregungskurve des Magneten  $B_{y0}=f(I)$  und der Verlauf der Größe  $G_0/B_{y0}$  als Funktion der Erregung sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

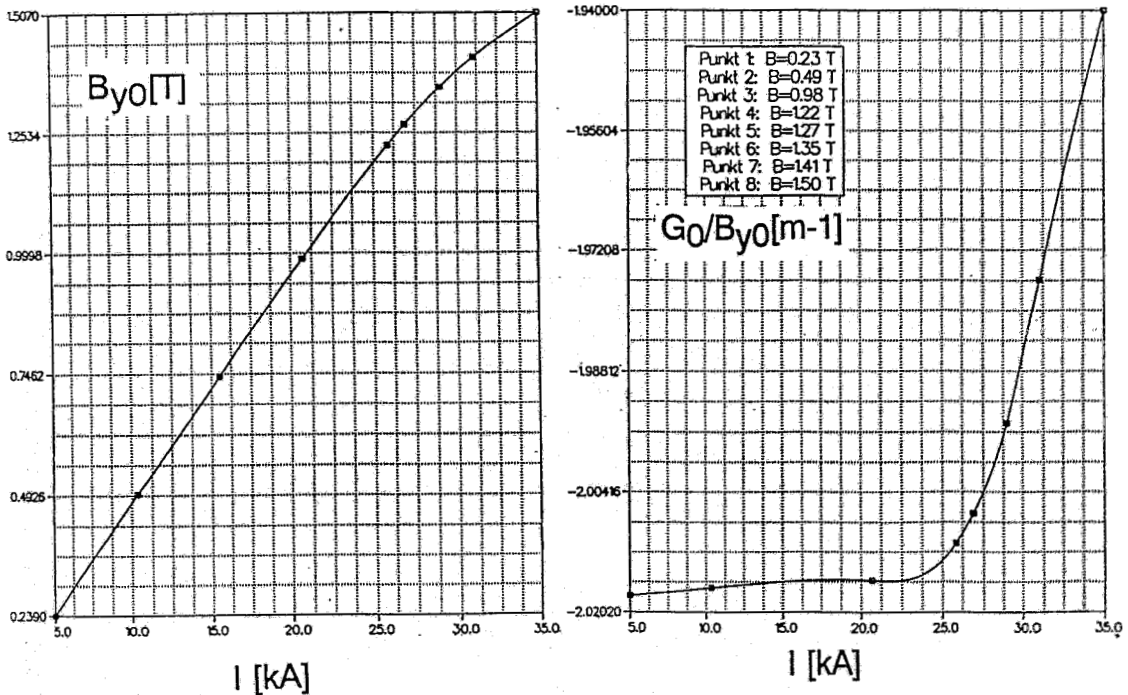


Abb. 6.8:  $B_0$  und  $G_0/B_{y0}$  als Funktion der Erregung des ROSY-Ablenkmagneten

Beide Darstellungen zeigen, daß der Sättigungseffekt in diesem Magneten bei Erregungen oberhalb 25200 Amperewindungen, d.h. bei Orbitflußdichten ab 1,25 T auftritt.

Wichtig für das Verhalten des Magneten im Speicherring ist das Verhältnis von Ablenkkfeld zu Gradient ( $B_{y0}/G_0$ ). Mit den Werten  $B_{y0}=1,4$  T und  $G_0=-2,8283$  T/m ergibt sich ein Wert von  $G_0/B_{y0}=-2,0202$  m<sup>-1</sup>. Wie man der Darstellung in Abb. 6.8 entnimmt, wird der Sollwert nicht ganz erreicht. Oberhalb von  $B_{y0}=1,25$  T ( $I=25200$  A) nimmt das Verhältnis  $G_0/B_{y0}$  ab und zwar um 1,8 % bis zum Nominalwert der Erregung von 1,4 T. Diese Nichtlinearität führt zu einem anderen Arbeitspunkt in y-Richtung. Der Speicherring muß daher so flexibel sein, daß diese Nichtlinearität beim Rampen kompensiert werden kann. Die Kompensation wird durch Veränderungen der Quadrupole in der Anpassungszelle erreicht (s. hierzu die Optiken für ROSY B und ROSY C in Abschnitt 2.2.5).

Vergleichsrechnungen für den ALS- und den ELETTRA-Ablenkmagneten zeigen: (vergl. auch Abb. 6.3, 6.4, 6.5)

- Die untersuchten Feld- bzw. Gradientabweichungen sowie der verbleibende Fehler sind für ROSY und ELETTRA etwa gleich groß und deutlich geringer als bei ALS.
- Gegenüber ELETTRA konnte die Gaphöhe bei ROSY um 25 % verringert werden.
- Im für ROSY untersuchten Bereich der Flußdichte sind die erhaltenen Abweichungen für den ROSY und den ELETTRA Magneten etwa symmetrisch zum Sollwert bzw. zu Null verteilt. Die entsprechenden Abweichungen beim ALS- Magneten sind weniger symmetrisch.
- Die Nichtlinearität von  $G_0/B_{y0}$  ist für die Ablenkmagneten von ELETTRA (3 %) und ROSY (2%) vergleichbar und beträgt bei ALS 0,5%.
- Die Sextupolstärken sind bei den Ablenkmagneten für ROSY und ELETTRA um eine Zehnerpotenz kleiner als bei ALS.

In Tabelle 6.7 sind alle Daten der optimierten ROSY-Ablenkmagneten zusammengefaßt.

Tab. 6.7: Daten der ROSY-Ablenkmagneten

Typ : C-Magnet, zur Ringaußenseite geöffnet, Endflächen parallel		
Ablenkwinkel	20°	15°
Anzahl der Magnete	12	8
Magnetische Länge [m]	2,436	1,866
Eisenjochlänge [m]	2,386	1,816
Gesamtlänge [m]	2,526	1,936
Polschuhbreite [m]	0,24	
Gaphöhe [mm]	52,0	
Energie [GeV]	3	
Ablenkradiusradius [m]	7,14771	
Flußdichte [T]	1,4	
Gradient [T/m]	2,8283	
Feldindex	14,44	
Windungszahl	48	
Zahl der Doppelspulen	6	
Kühlkreisläufe	6	
Spulenform	"racetrack"	
Hohlleiterquerschnitt (17*16 $\phi$ 9.5)	208,4	
Nominalstrom	1293	
Widerstand pro Magnet [m $\Omega$ ]	22,7	17,8
Spannungsabfall [V]	29,4	23
Stromdichte [A/mm <sup>2</sup> ]	6,6	
Induktivität [mH]	26	20
Amperewindungen	62064	
Erregerleistung pro Magnet [kW]	38	29,7
Eisenmasse [to]	8,6	6,7
Masse der Kupferwicklung [kg]	525	402
Kühlwasserdruck [kp/cm <sup>2</sup> ]	5,2	
Kühlwasserfluß [l/h]	616	
Temperaturerhöhung des Kühlwassers [°C]	10	
Kühlwassergeschwindigkeit [m/s]	2,7	

### 6.3 Quadrupole

Der Entwurf der Quadrupolmagnete für ROSY stützt sich auf Quadrupole, die Gradienten  $G=20 \text{ T/m}$  liefern. Verglichen wurden daher die Eigenschaften entsprechender Quadrupole der Speicherringe ELETTRA [Za 93], ESRF [Ro 90, Li 93] und KfK [Sw 93].

Zur Analyse der Eigenschaften dieser Magnete wurden die y-Komponente der Feldstärke  $B_y(x)$  und der Gradient  $G(x) = \frac{dB_y(x)}{dx}$  als Funktion des Abstands vom Orbit mittels POISSON-Rechnungen bestimmt. Als Beispiel dazu sind Flußdichte und Gradient für den hier vorgeschlagenen ROSY-Quadrupol, der im wesentlichen auf dem ELETTRA-Entwurf [To 93] beruht, in Abbildung 6.9 dargestellt.

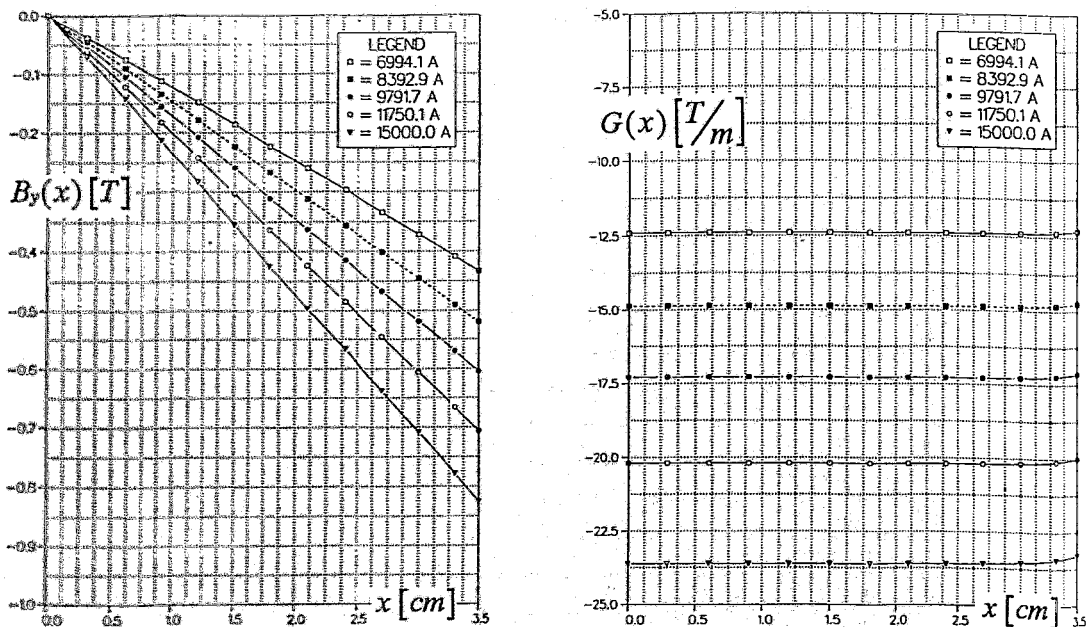


Abb. 6.9: Flußdichte und Gradient im ROSY-Quadrupol

daraus wurde der normierte Gradient

$$G_n = \frac{B(x) - B(x_0)}{(x - x_0)}$$

errechnet, wobei als Bezugspunkt  $x_0$  nicht die Quadrupolmitte gewählt wurde, denn hier verschwindet die magnetische Flußdichte, sondern  $x_0=1 \text{ cm}$ . Hieraus wurden die Abweichung des normierten Gradienten bezogen auf die Größe dieses Gradienten in der Nähe des Orbits (bei  $x=1 \text{ cm}$ )

$$G_n(x) - G_n(x = 1\text{cm})$$

und schließlich die relative Abweichung des Gradienten in %

$$\Delta G_n = \frac{G_n(x) - G_n(x = 1\text{cm})}{G_n(x = 1\text{cm})} \quad (6.8)$$

bestimmt.

Abbildung 6.10 zeigt die relative Abweichung des Gradienten gemäß der Gleichung (6.8) für den ROSY-Quadrupol.

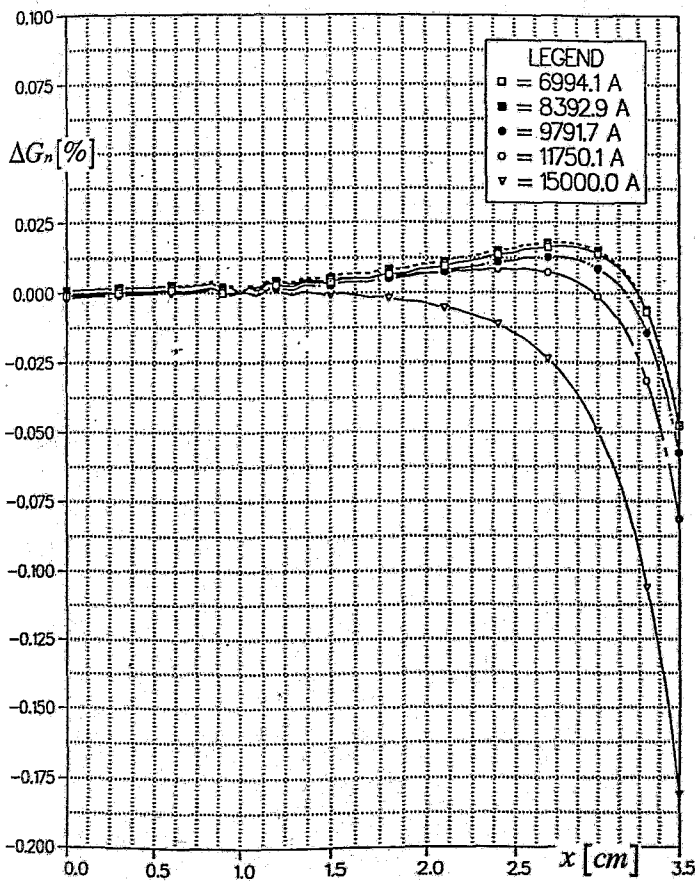
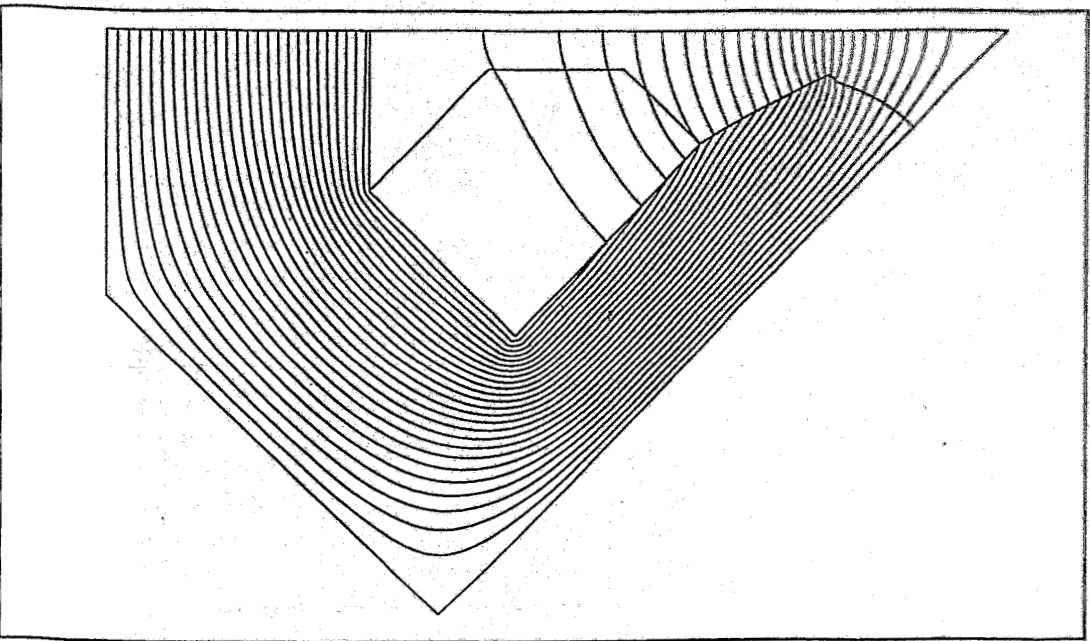


Abb. 6.10: Relative Abweichung des Gradienten vom Bezugswert in der Nähe des Orbits für den ROSY-Quadrupol

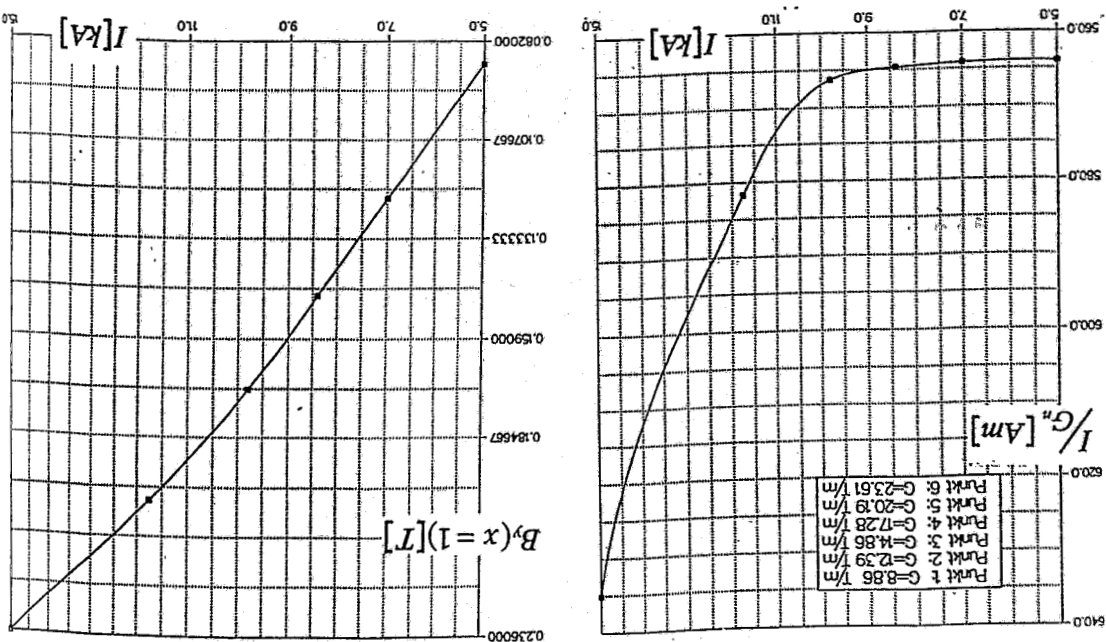
Weiterhin wurde die Feldstärke des Quadrupols in Abhängigkeit der Erregung (Erregungskurve) und das Verhältnis von Erregerstrom zum Gradienten in der Nähe des Orbits ( $x=1\text{ cm}$ ) in einem Wertebereich des Gradienten zwischen 8,86 und 23,61 T/m bestimmt (s. Abb. 6.11). Das Verhältnis von Erregerstrom zum Gradienten in der Nähe des Orbits zeigt das Sättigungsverhalten des Quadrupols besonders deutlich. Bis zu Gradienten von 17,5 T/m (maximal bei ROSY vorkommend), ist die Sättigung vernachlässigbar.

Abb. 6.12: Teil der Kontur des ROSY-Quadrupols und Fluiddichteverteilung



Die in den POISSON-Rechnungen genutzte Kontur der Halbzelle eines Quadrupolviertels und die Fluiddichteverteilung für den ROSY-Quadrupol werden in der Abbildung 6.12 dargestellt.

Abb. 6.11: Erregungskurve und Verhältnis von Erregerstrom zum Gradienten in der Nähe des Orbits ( $x=1$  cm) für den ROSY-Quadrupol



Wir vergleichen das Verhalten der Quadrupole [To 93], [Li 93], [Sw 93]. Dabei wird an dieser Stelle eine Version des ROSY-Quadrupols benutzt, bei der die Polachsen um  $42^\circ$  gegen die Symmetrielinie geneigt sind (s. auch Abb. 6.15).

$$\Delta G_n = f(x)$$

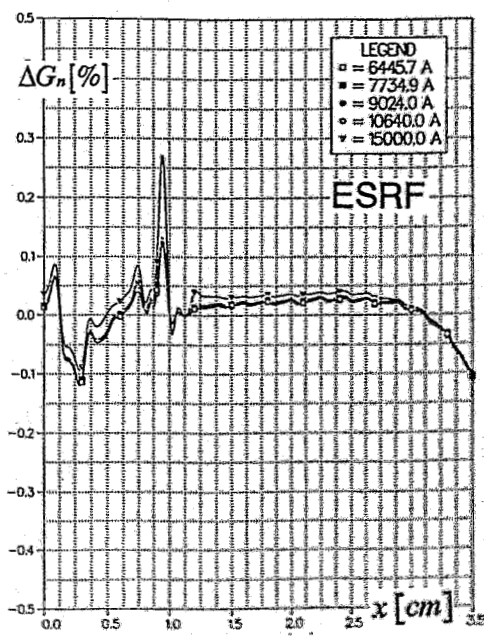
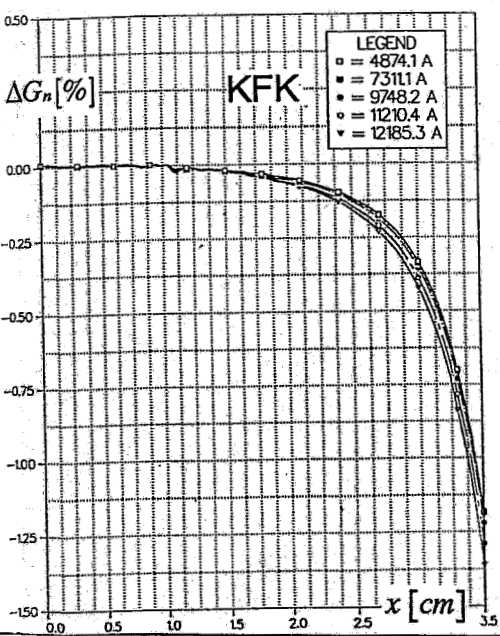
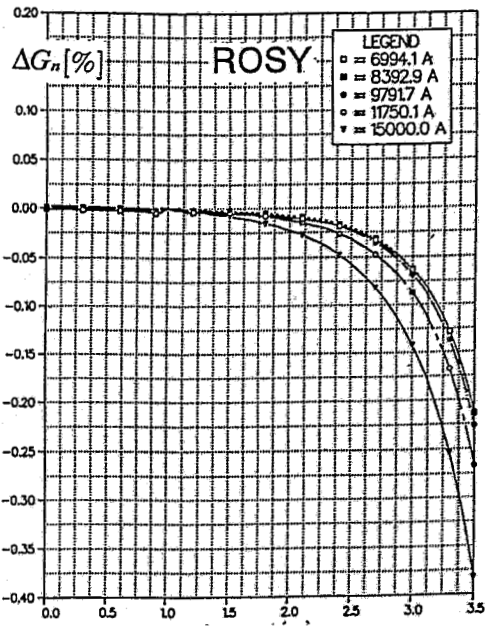


Abb. 6.13: Abweichungen der Gradienten gemäß Formel (6.8) für die drei untersuchten Quadrupole

Abb. 6.13 zeigt die Abweichung des Gradienten gemäß Formel (6.8) für die Magneten als Funktion des Abstands vom Orbit. In Abbildung 6.14 wird das Verhältnis  $I/G(x=1 \text{ cm})$  für die drei untersuchten Quadrupole zusammengestellt.

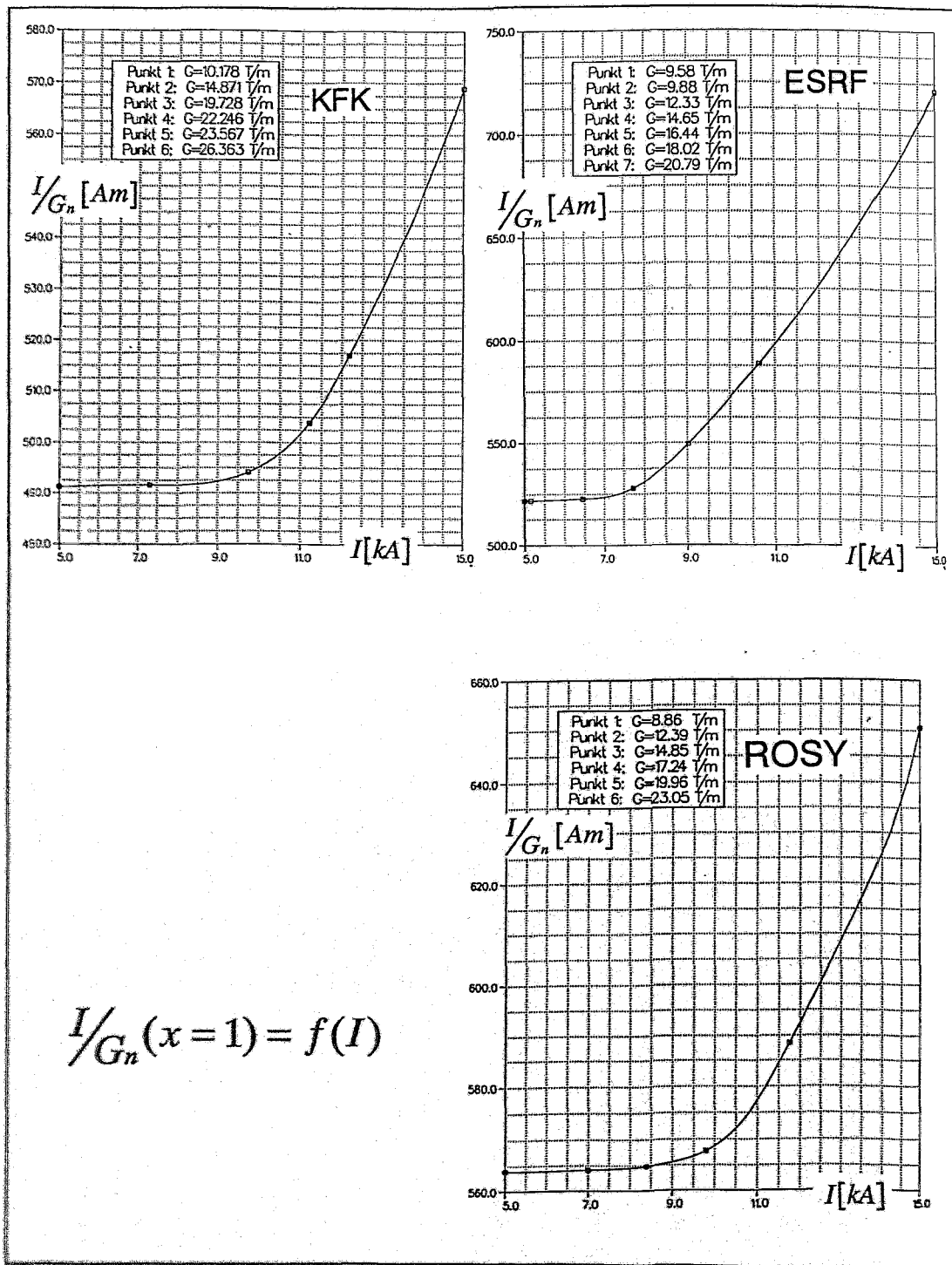


Abb. 6.14: Vergleich des Sättigungsverhaltens der drei Quadrupole anhand des Verhältnisses  $I/G(x=1 \text{ cm})$



Die Abweichung des Gradienten innerhalb eines Bereichs von 2,5 cm auf beiden Seiten des Orbits sind gemäß Abb. 6.13 für den ROSY-Quadrupol ausreichend klein und der KfK-Magnet benötigt die kleinste Erregung zur Erzeugung des Orbitgradienten. Aus Abb. 6.14 entnimmt man, daß die drei Quadrupole ein unterschiedliches Sättigungsverhalten besitzen. Beim ESRF-Quadrupol tritt die Sättigung bei  $G=14$  T/m ein, beim KfK-Quadrupol bei 20 T/m und beim ROSY-Quadrupol bei 17,5 T/m.

Im Speicherring ROSY ist vorgesehen, die Synchrotronstrahlung zwischen den Erregerwicklungen des Quadrupols hindurch austreten zu lassen. Die Wicklungen zweier Pole im KfK-Quadrupol liegen jedoch so eng beieinander, daß ohne Designänderung eine Verwendung für ROSY nicht möglich ist. Sättigungsverhalten und das Vorliegen eines ausgereiften Entwurfs war der Grund für die Wahl des ROSY-Quadrupols.

Einen Schnitt durch diesen ROSY-Quadrupol zeigt Abbildung 6.15

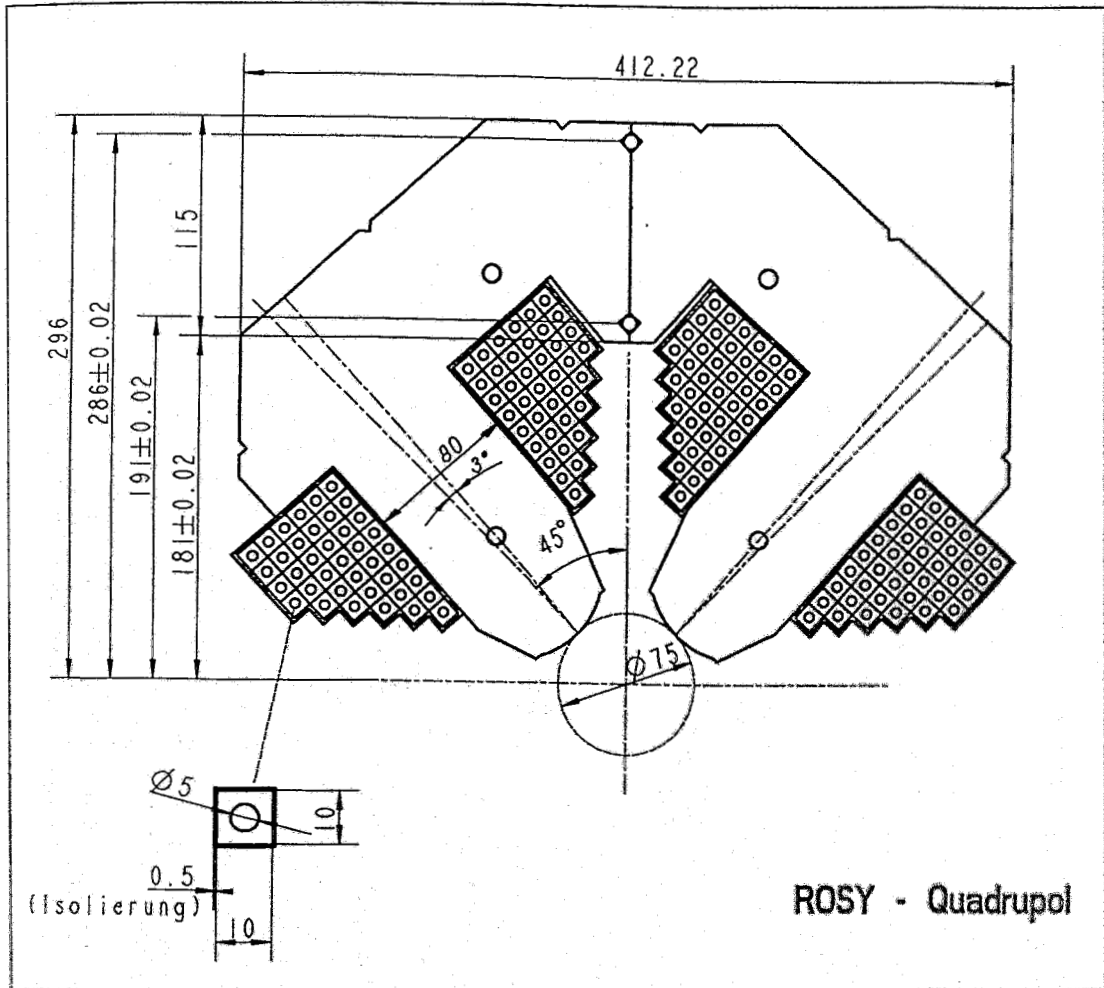


Abb. 6.15: Schnitt durch den ROSY-Quadrupol

Der vorgeschlagene ROSY-Quadrupol basiert auf dem ELETTRA-Quadrupol. Das Eingabefile für den Quadrupol wurde uns zur Verfügung gestellt [Li 92]. Die POISSON-Eingabeliste ist in der Tabelle 6.8 dargestellt.

Tab. 6.8: POISSON-Eingabeliste für den ROSY-Quadrupol

```

QUAD ELETTRA /13.10.93/ -3 Grad
$REG NREG=7,DX=0.2,DY=0.1,XMAX=28.26,YMAX=17.39,
  YREG1=4.0,LREG1=41,YMAX=17.39,LMAX=151,
  KMAX=142,LINX=0,LINY=0,NPOINT=6$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$PO X=27.81, Y=0.0$
$PO X=28.26, Y=7.14$
$PO X=19.03, Y=17.39$
$PO X=2.652, Y=2.652$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$REG MAT=2,NPOINT=17$
$PO X=2.652, Y=2.652$
$PO X=2.881, Y=2.441$
$PO X=3.2, Y=2.198$
$PO X=3.467, Y=2.029$
$PO X=3.8, Y=1.851$
$PO X=4.1, Y=1.715$
$PO X=4.416, Y=1.593$
$PO X=4.778, Y=1.472$
$PO X=5.0, Y=1.250$
$PO X=9.558, Y=3.901$
$PO X=14.25, Y=8.103$
$PO X=18.03, Y=3.899$
$PO X=17.80, Y=0.0$
$PO X=27.81, Y=0.0$
$PO X=28.26, Y=7.14$
$PO X=19.03, Y=17.39$
$PO X=2.652, Y=2.652$
$REG MAT=1,CUR=6994.1,NPOINT=6$
$PO X=8.71, Y=3.11$
$PO X=14.25, Y=8.103$
$PO X=18.03, Y=3.899$
$PO X=14.61, Y=0.82$
$PO X=10.78, Y=0.8$
$PO X=8.71, Y=3.11$
$REG NPOINT=2, IBOUND=0$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$PO X=2.652, Y=2.652$
$REG NPOINT=2, IBOUND=0$
$PO X=2.652, Y=2.652$
$PO X=19.03, Y=17.39$
$REG NPOINT=2, IBOUND=0$
$PO X=19.03, Y=17.39$
$PO X=28.26, Y=7.14$
$REG NPOINT=2, IBOUND=0$
$PO X=28.26, Y=7.14$
$PO X=27.81, Y=0.0$

```

## 6.4 Sextupole

Entsprechend den Berechnungen zur chromatischen Kompensation (s. Abschnitt 'Magnetfeldstruktur'), werden bei einer Länge der Sextupole von 10 cm differentielle Gradienten von  $g' = d^2B_y/dx^2 = 400 \text{ T/m}^2$  benötigt. Der Entwurf der ROSY-Sextupole lehnt sich daher an die Sextupole des Speicherrings APS [AP 87] an, bei dem diese für Speicherringe der dritten Generation typischen Gradienten verwendet werden. Allerdings mußte die Abmessung der ROSY-Vakuumkammer berücksichtigt und damit der Polabstand verändert werden. Außerdem wurde die Spulenanordnung gegenüber dem Vorbild modifiziert.

Die Daten der ROSY-Sextupole sind in der Tabelle 6.10 zusammengefaßt.

Tab. 6.10: Daten der ROSY-Sextupole

Anzahl der Sextupole	48
Magnetische Länge [mm]	100
Jochlänge [mm]	90
Gesamtlänge [mm]	110
Nominalenergie [GeV]	3
Aperturradius [mm]	42
Diff. Gradient [ $\text{T/m}^2$ ]	500
Flußdichte a. d. Polspitze [T]	0,44
Zahl der Spulen	6
Windungszahl pro Spule	25
Leiterquerschnitt [ $\text{mm}^2$ ]	7*7 , Bohrung $3\phi$
Amperewindungen [A]	5000
Strom [A]	200
Stromdichte [ $\text{A/mm}^2$ ]	4,77
Kühlkreisläufe	1
Spannungsabfall pro Magnet [V]	6
Widerstand pro Magnet [ $\Omega$ ]	0,264
Leistung pro Magnet [kW]	1,2
Temperaturerhg. d. Kühlwassers [ $^\circ\text{C}$ ]	10
Druckabfall d. Kühlwassers [bar]	4,3

Die Eigenschaften der ROSY-Sextupole wurden mittels POISSON berechnet und sind in der folgenden Abbildung erläutert.

Im ersten Teil der Abbildung 6.16 ist die in Gl.(6.7) verwendete Größe  $S_0$  im ROSY-Sextupol im Erregungsbereich zwischen 1000 und 5000 Ampere-windungen dargestellt. Da  $S_0$  gerade der Hälfte des differentiellen Gradienten entspricht (s. Gl. 6.7), ist erkennbar, daß der vorgeschlagene Sextupol ausreichend stark ist. Der andere Teil der Abbildung 6.16 zeigt anhand der Abweichung von  $S_0$  vom Sollwert, daß die Shimierung an den Rändern des

Im Vergleich zum ELETTRA-Quadrupol wurde jedoch - ohne die optischen Eigenschaften und das Sättigungsverhalten zu verschlechtern - die Jochstärke um 30 % verringert und durch eine günstigere Auslegung der Erregerwicklung die Erregerleistung von 8,9 auf 3,5 kW gesenkt. Die Daten der ROSY-Quadrupole sind in der Tabelle 6.9 zusammengefaßt.

Tab. 6.9: Daten der ROSY-Quadrupole

Teilungssymmetrie		8-fach	
Anzahl der Magnete	8	16	32
Magnetische Länge [m]	0,60	0,40	0,28
Aperturdurchmesser [mm]		75	
Eisenjochlänge [m]	0,56	0,36	0,24
Gesamtlänge [m]	0,74	0,54	0,42
Gradient [T/m]	17	18	18
Windungszahl pro Pol		39	
Zahl der Kühlkreise		2	
Hohlleiterquerschnitt (10*10 5) [mm] <sup>2</sup>		80	
Widerstand [mΩ]	53,2	39,6	31,6
Amperewindungen pro Pol	10200	10800	10800
Nominalstrom [A]	261,5	277	277
Spannungsabfall [V]	13,9	11,0	8,75
Erregerleistung pro Einheit [kW]	3,64	3,05	2,42
Eisenmasse pro Einheit [kg]	516	342	226
Masse der Kupferwicklung [kg]	207	145	104
Temperaturerhg. des Kühlwassers [°C]		10	
Kühlwasserfluß [l/h]	156	130	104
Kühlwasserdruck [kp/cm <sup>2</sup> ]	8,0	4,0	2,1
Kühlwassergeschwindigkeit [m/s]	1,11	0,92	0,73

Polschuhs noch verbessert werden muß. Dabei wurde, wie im Fall der Quadrupole, als Sollwert von  $S_0$  der Wert in 1 cm Entfernung vom Orbit benutzt.

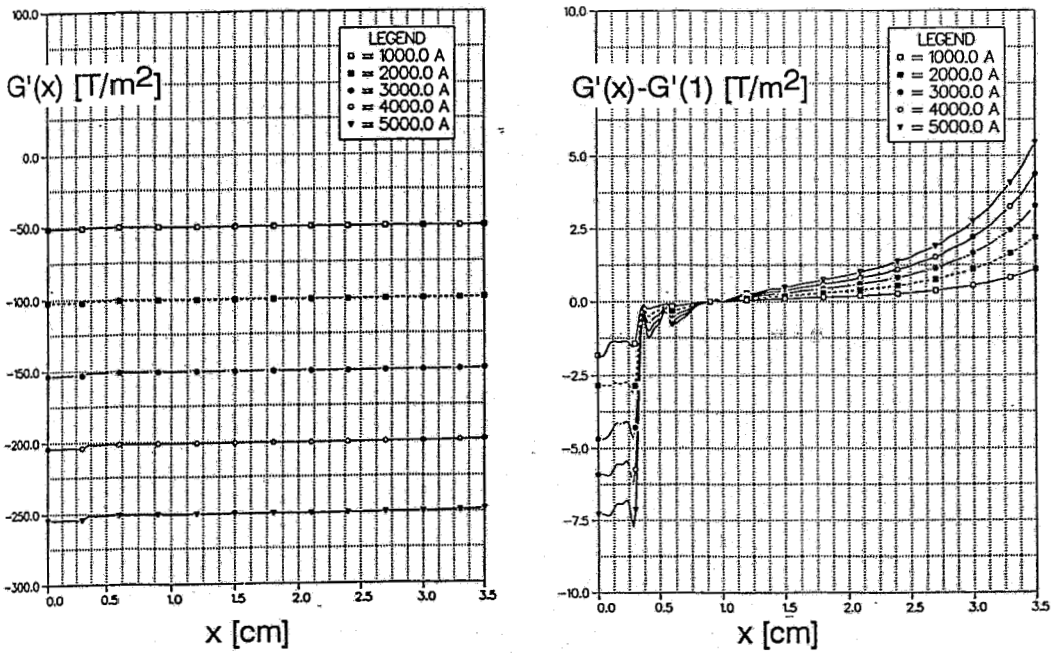


Abb. 6.16:  $S_0$  sowie Abweichung von  $S_0$  im ROSY-Sextupol für verschiedene Erregungen ( $2S_0$  entspricht dem differentiellen Gradienten)

Der Schnitt durch den ROSY-Sextupol ist in Abbildung 6.17 dargestellt.

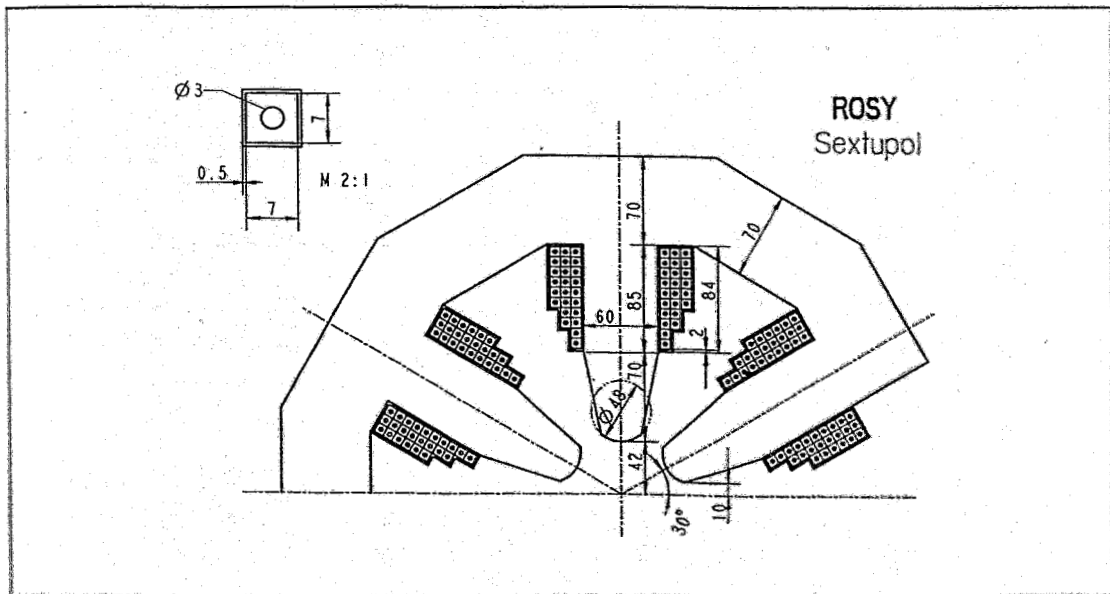


Abb.6.17: Schnitt durch den ROSY-Sextupol

Die POISSON-Eingabeliste und damit die Abmaße der Kontur des ROSY-Sextupols sind der folgenden Tabelle 6.11 zu entnehmen.

Tab. 6.11: Eingabeliste für den ROSY-Sextupol

```
SEX /20.10.93/ ROSY 1/12 Tangentenendpunkt bei X=4.90
$REG NREG=4,DX=0.22,DY=0.18,XMAX=26.7,YMAX=13.35,
LINX=1,LINY=1,NPOINT=5$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$PO X=23.1, Y=13.35$
$PO X=26.7, Y=6.6$
$PO X=26.7, Y=0.0$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$REG MAT=2,NPOINT=15$
$PO X=3.637, Y=2.1$
$PO X=3.768, Y=1.9$
$PO X=3.935, Y=1.7$
$PO X=4.149, Y=1.5$
$PO X=4.423, Y=1.3$
$PO X=4.781, Y=1.1$
$PO X=4.900, Y=1.0$
$PO X=11.2, Y=3.0$
$PO X=18.56, Y=7.251$
$PO X=19.96, Y=4.827$
$PO X=19.96, Y=0.0$
$PO X=26.7, Y=0.0$
$PO X=26.7, Y=6.6$
$PO X=23.1, Y=13.35$
$PO X=3.637, Y=2.1$
$REG MAT=1,CUR=5000.0,NPOINT=6$
$PO X=11.2, Y=3.0$
$PO X=11.8, Y=1.96$
$PO X=15.49, Y=1.96$
$PO X=19.96, Y=4.827$
$PO X=18.56, Y=7.251$
$PO X=11.2, Y=3.0$
$REG IBOUND=0, NPOINT=4$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$PO X=23.1, Y=13.35$
$PO X=26.7, Y=6.6$
$PO X=26.7, Y=0.0$
```

## 6.5 Korrekturmagnete

Die Korrekturmagnete für ROSY sollen Winkelkorrekturen von 1,5 mrad bei der Nominalenergie (3 GeV) für die x-Richtung, für die y-Richtung sowie auch für x- und y-Richtung gleichzeitig ermöglichen.

Es wurden daher drei unterschiedliche Korrekturmagneten entwickelt. Als Vorbild dienten APS-Korrektoren [AP 87]. Allerdings wurden die Gaps der Magneten der Höhe der ROSY-Vakuumkammer angepaßt, die 50 mm beträgt. In Tabelle 6.12 sind die Eigenschaften der ROSY-Korrekturmagnete zusammengefaßt.

Abbildung 6.18 zeigt Schnitte durch die Korrekturmagneten.

Tab. 6.12: Daten der ROSY-Korrekturmagnete

	Horizontal- korrektur	Vertikal- korrektur	Horizontal& Vertikal- Korrektur
Dipolfeld	vertikal	horizontal	horiz/vertik
Anzahl	24	24	24
Flußdichtemaximum bei 3 GeV [T]	0,130	0,130	0,075
$ \Delta B/B $ [%]	0,2	0,2	
mechanische Länge [m]	0,14	0,14	0,14
effektive Länge [m]	0,14	0,14	0,20
Gap Höhe [mm]	55	120	120/178
Höhe des Stromleiters [mm]	4,3	4,3	4,3
Breite des Stromleiters [mm]	4,3	4,3	4,3
Durchmesser der Leiterbohrung [mm]	2,4	2,4	2,4
Windungszahl pro Pol	60	120	80/140
Induktivität [mH]	6,12	25	3/4
Widerstand [mΩ]	78	90	44/77
Spitzenstrom [A]	50	50	90/76
Spannung [V]	3,9	4,51	3,96/5,87
Kühlwasser-Durchfluß [m/s]	1,02	1,19	1,18/1,57
Kühlwasserdruck [bar]	7,51	10	8,24/8,75
Temperaturanstieg des Kühlwas. [°C]	10	10	12/20
Leistung [W]	193	225	712/892
Kühlkreisläufe	1	1	2/2

Anm.: Horizontal- und Vertikalmagnet besitzen je zwei Spulen, der Horizontal/Vertikalmagnet besitzt vier Spulen. Die Angaben in der Tabelle beziehen sich jeweils auf einen Magneten.

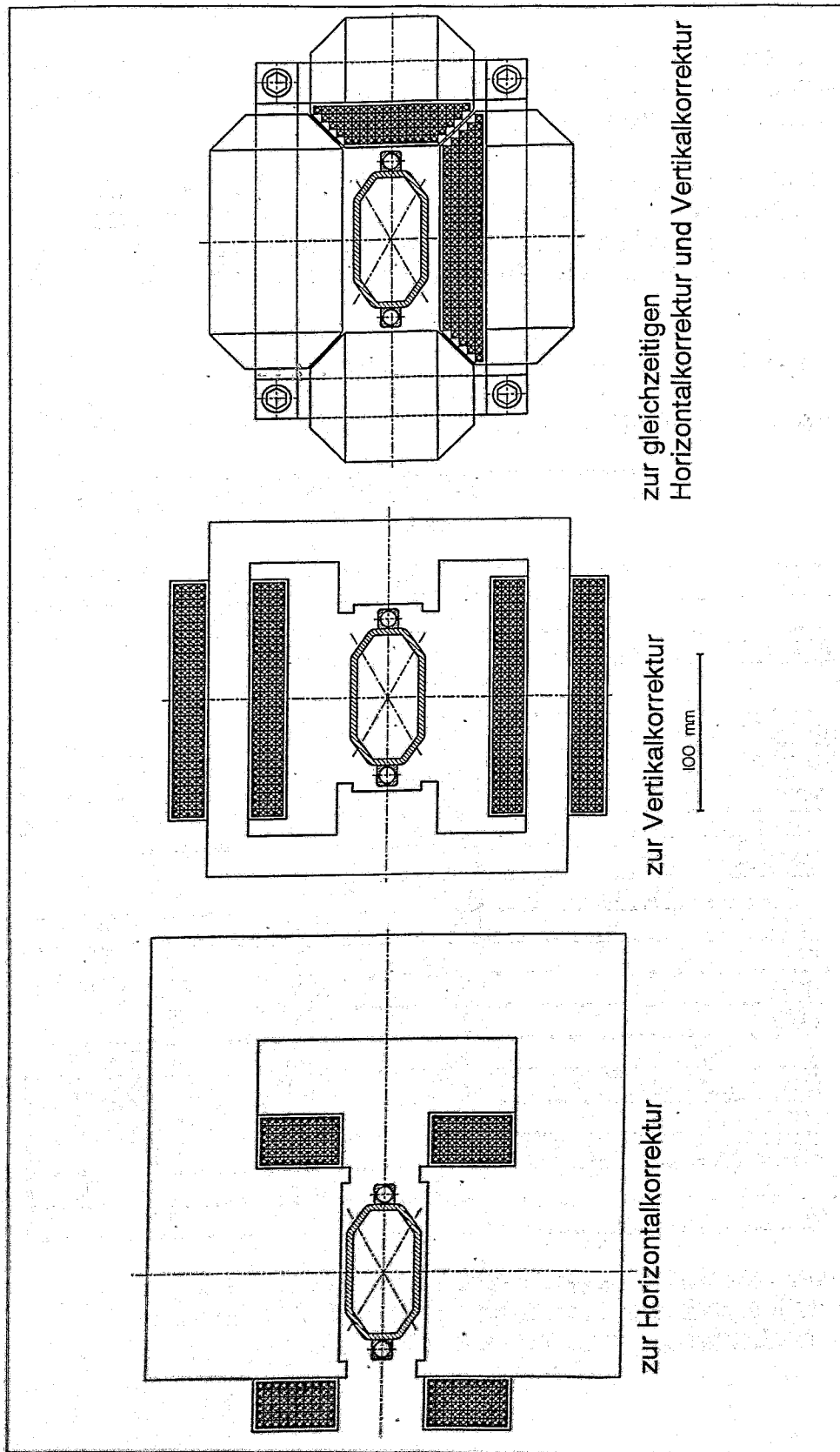


Abb. 6.18: Korrekturmagnete für ROSY



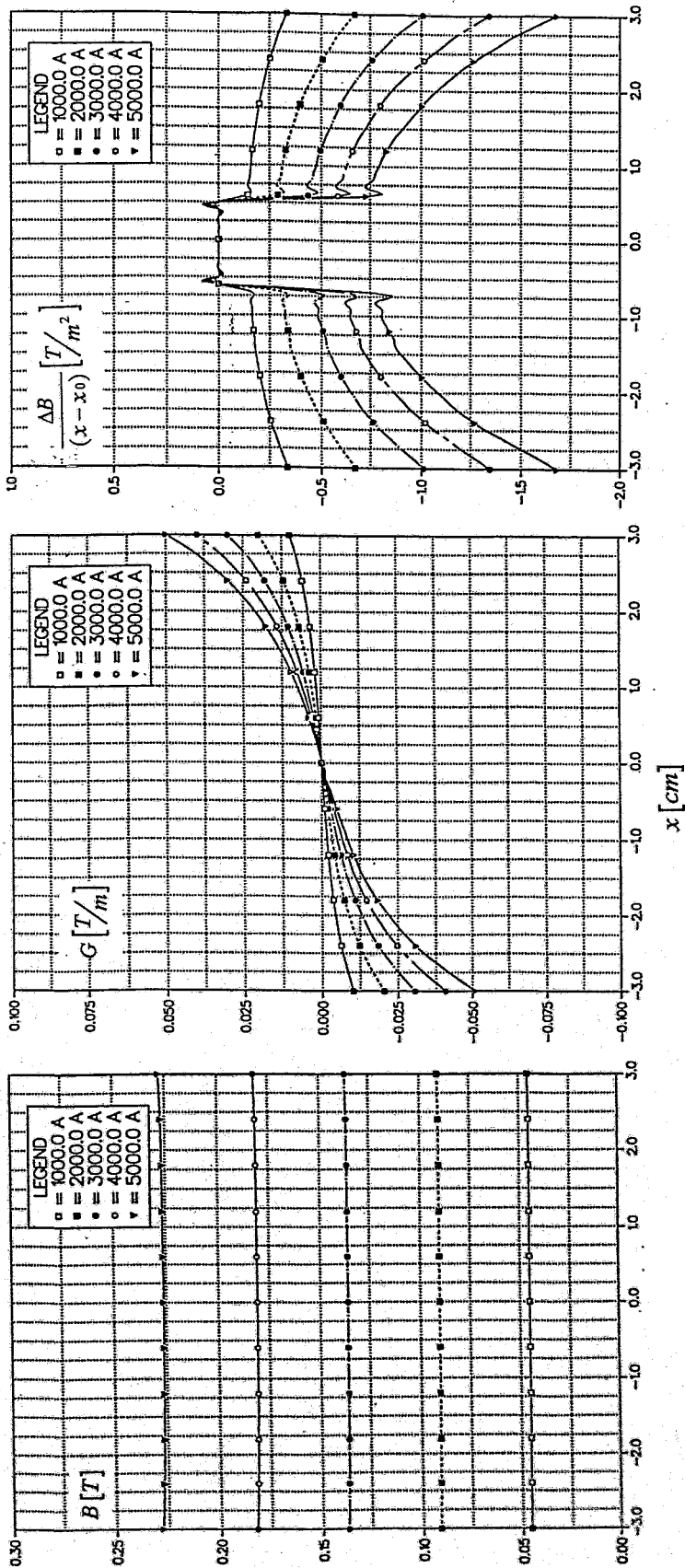


Abb. 6.19: Magnet zur horizontalen Strahlkorrektur für ROSY  
Flußdichte, Gradient und Sextupolanteil in Abhängigkeit des Abstands zum Orbit

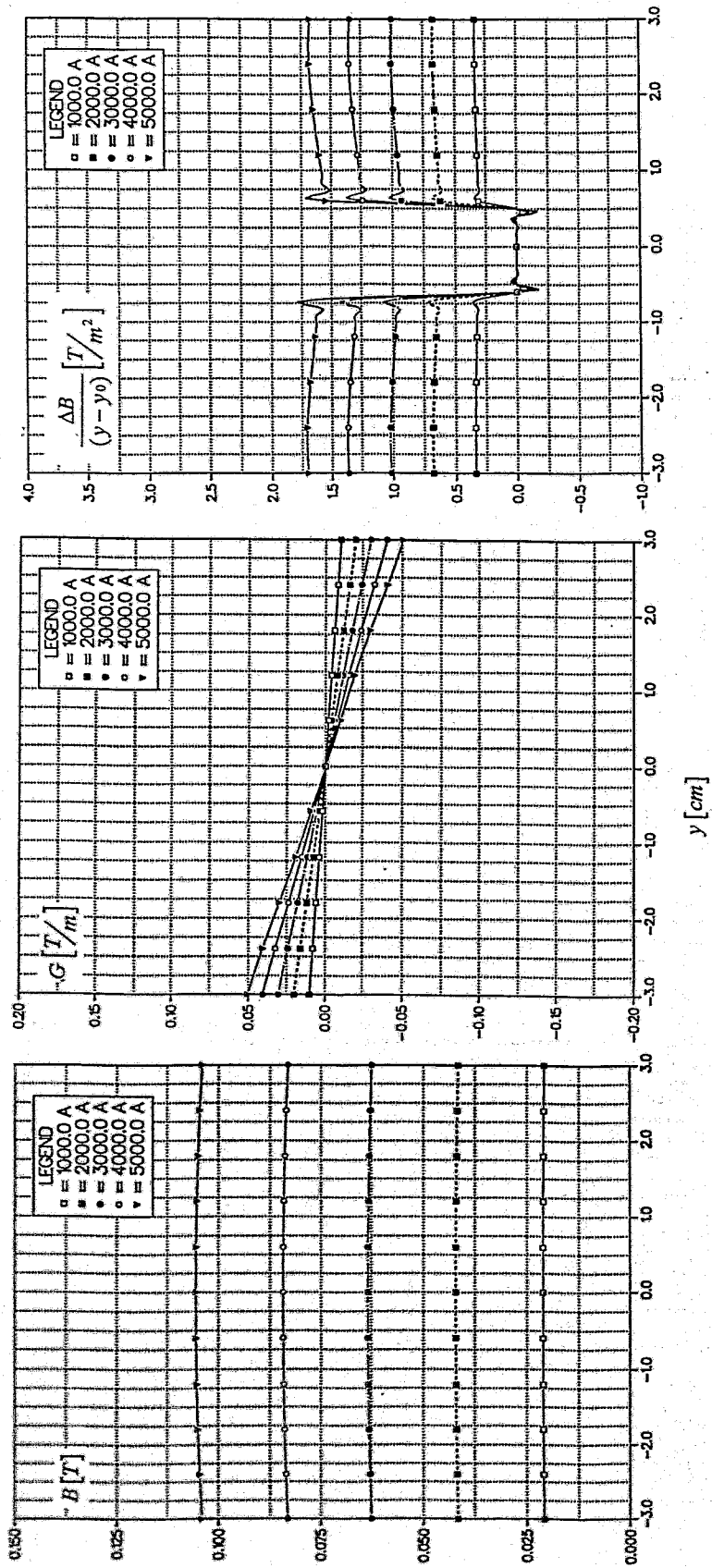


Abb. 6.20: Magnet zur vertikalen Strahlkorrektur für ROSY  
Flußdichte, Gradient und Sextupolanteil in Abhängigkeit des Abstands zum Orbit

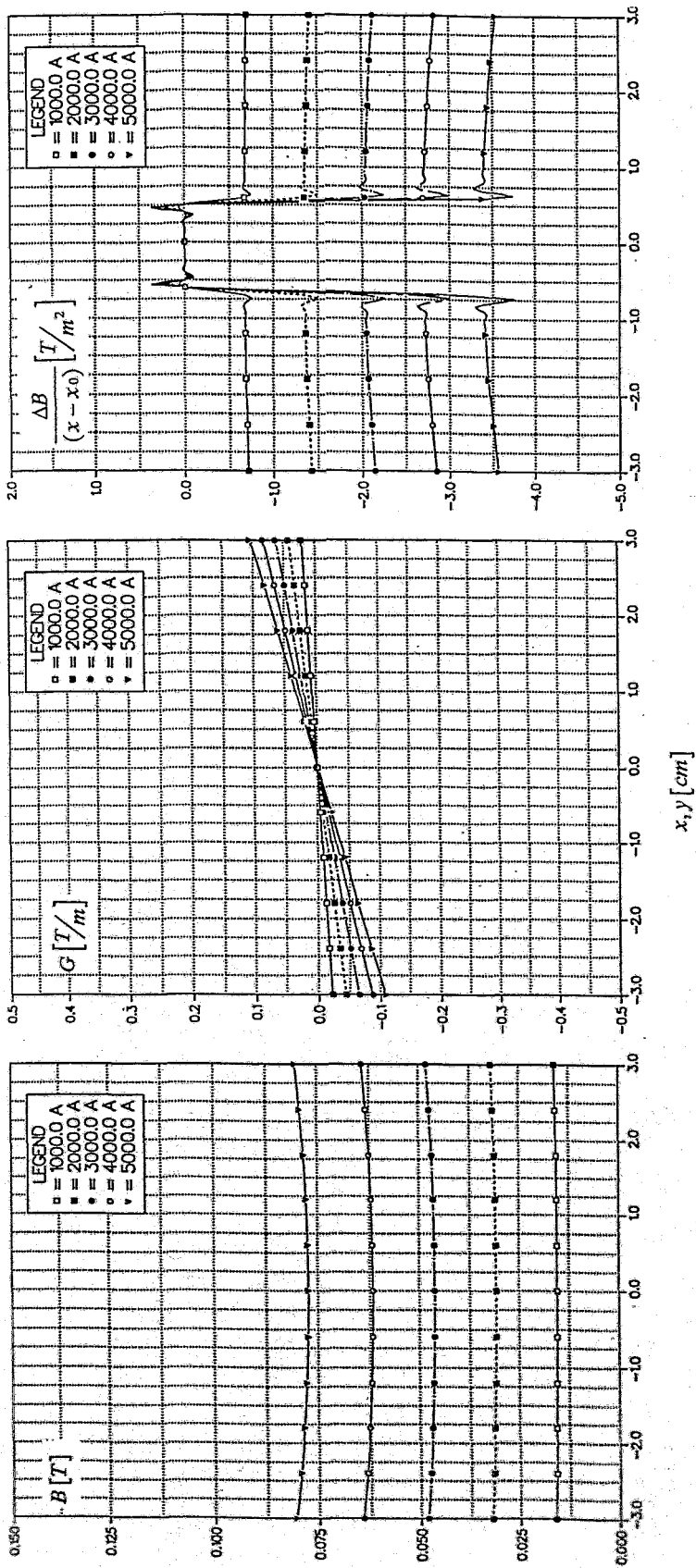


Abb. 6.21: Magnet zur gleichzeitigen vertikalen und horizontalen Strahlkorrektur für ROSY  
 Flußdichte, Gradient und Sextupolanteil in Abhängigkeit des Abstands zum Orbit

In der Abbildung 6.19 sind die Flußdichte und die in Analogie zum Abschnitt 6.2 bestimmten Größen Gradient (gemäß Formel 6.5) sowie Sextupolanteil (gemäß Formel 6.7) in Abhängigkeit des Abstands vom Orbit in der Mittelebene des horizontalen Korrekturmagneten bei unterschiedlichen Erregungen dargestellt.

Entsprechende Ergebnisse werden für den Magneten zur vertikalen Strahlkorrektur in der Abbildung 6.20 und in der Abbildung 6.21 für den Magneten zur gleichzeitigen Korrektur beider Strahlrichtungen angegeben.

Die Winkelkorrektur bestimmt sich aus der zur Korrekturrichtung senkrechten Komponente der Flußdichte  $B$ , der effektiven Länge des Korrekturmagneten  $l$  und der Energie der Elektronen gemäß

$$\delta' [\text{mrad}] = 0.2998 \frac{B [T] l [\text{mm}]}{E [\text{GeV}]} \quad (6.9)$$

Die berechneten Flußdichten der Korrekturmagneten (s. grafische Darstellungen Abb. 6.19, 6.20, 6.21) und die in Tabelle 6.12 angegebenen effektiven Längen der Korrekturmagnete ermöglichen die gewünschte Winkelkorrektur. Im horizontalen und im vertikalen Korrekturmagnet ist der Wickelraum noch nicht ausgenutzt. Damit verfügen diese Korrekturmagneten noch über Reserven.

Die geforderte Feldhomogenität (s. Tab. 6.12) ist erreicht und die unerwünschten Feldanteile in den Korrekturmagneten sind, wie die Abbildungen 6.19, 6.20 und 6.21 zeigen, gering.

Die POISSON-Eingabelisten für die Korrekturmagnete sind in der Tabelle 6.13 zusammengestellt.

## 6.6 Zusammenfassung

Im Abschnitt 6 wurden Vorgehensweise und Ergebnisse zum Entwurf der Ablenk-, Quadrupol-, Sextupol- und Korrekturmagneten für den Speicherring ROSY erläutert. Die benötigten Felder werden erreicht und Feldabweichungen von 5 Gauss im Bereich von 2,5 cm zu beiden Seiten des Sollorbits werden nicht überschritten. Insbesondere wurde der Einfluß des Rampens der Maschine auf die magnetischen Parameter untersucht und gefunden, daß die auftretenden Abweichungen zwischen fokussierenden und ablenkenden Feldern in den Ablenkmagneten 2% nicht überschreiten.

Der rechnerische Vergleich mit den Parametern anderer Speicherringe der dritten Generation zeigte, daß die ROSY-Magnete vergleichbare oder geringere Abweichungen von den vorgegebenen Feldgrößen der magnetischen Elemente aufweisen. Auch das Sättigungsverhalten der ROSY-Magnete ist vergleichbar oder besser.

## Horizontalkorrektur

```

ROSY HORIZONTAL CORRECTOR /21.9.93/
$REG NREG=4,DX=0.3,DY=0.3,XMAX=40.0,YMAX=20.0,
  KMAX=135,LMAX=68,LINX=0,LINY=0,NPOINT=5$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$PO X=40.0, Y=0.0$
$PO X=40.0, Y=20.0$
$PO X=0.0, Y=20.0$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$REG MAT=2,NPOINT=13$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$PO X=6.8, Y=0.0$
$PO X=6.8, Y=10.8$
$PO X=19.2, Y=10.8$
$PO X=19.2, Y=2.25$
$PO X=20.2, Y=2.25$
$PO X=20.2, Y=2.75$
$PO X=31.8, Y=2.75$
$PO X=31.8, Y=2.25$
$PO X=32.8, Y=2.25$
$PO X=32.8, Y=17.6$
$PO X=0.0, Y=17.6$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$REG MAT=1,CUR=3000.0,NPOINT=5$
$PO X=16.7, Y=10.8$
$PO X=16.7, Y=2.75$
$PO X=19.2, Y=2.75$
$PO X=19.2, Y=10.8$
$PO X=16.7, Y=10.8$
$REG MAT=1,CUR=-3000.0,NPOINT=5$
$PO X=32.8, Y=10.8$
$PO X=32.8, Y=2.75$
$PO X=35.3, Y=2.75$
$PO X=35.3, Y=10.8$
$PO X=32.8, Y=10.8$

```

## Vertikalkorrektur

```

ROSY V-CORRECTOR VERSION IIII /30.9.93/
$REG NREG=5,DX=0.3,DY=0.3,XMIN=-12.2,XMAX=12.2,YMAX=12.0,
  KMAX=83,LMAX=41,LINX=0,LINY=0,NPOINT=5$
$PO X=-12.2, Y=0.0$
$PO X= 12.2, Y=0.0$
$PO X= 12.2, Y=12.0$
$PO X=-12.2, Y=12.0$
$PO X=-12.2, Y=0.0$
$REG MAT=2,NPOINT=17$
$PO X=-11.4, Y=0.0$
$PO X= -8.8, Y=0.0$
$PO X= -8.8, Y=8.8$
$PO X= -3.2, Y=8.8$
$PO X= -3.2, Y=5.5$
$PO X= -2.2, Y=5.5$
$PO X= -2.2, Y=6.0$
$PO X=  2.2, Y=6.0$
$PO X=  2.2, Y=5.5$
$PO X=  3.2, Y=5.5$
$PO X=  3.2, Y=8.8$
$PO X=  8.8, Y=8.8$
$PO X=  8.8, Y=0.0$
$PO X= 11.4, Y=0.0$
$PO X= 11.4, Y=11.4$
$PO X=-11.4, Y=11.4$
$PO X=-11.4, Y=0.0$
$REG MAT=1,CUR=5000.0,NPOINT=5$
$PO X=-8.8, Y=0.0$
$PO X=-8.8, Y=5.8$
$PO X=-6.0, Y=5.8$
$PO X=-6.0, Y=0.0$
$PO X=-8.8, Y=0.0$
$REG MAT=1,CUR=-5000.0,NPOINT=5$
$PO X=6.0, Y=0.0$
$PO X=6.0, Y=5.8$
$PO X=8.8, Y=5.8$
$PO X=8.8, Y=0.0$
$PO X=6.0, Y=0.0$
$REG IBOUND=0,NPOINT=4$
$PO X=-11.4, Y=0.0$
$PO X=-11.4, Y=11.4$
$PO X= 11.4, Y=11.4$
$PO X= 11.4, Y=0.0$

```

Kombinierte Horizontal- und  
Vertikalkorrektur

```

ROSY HV-STEERER /21.9.93/
$REG NREG=6,DX=0.3,DY=0.3,XMAX=24.4,YMAX=12.0,
  KMAX=82,LMAX=41,LINX=0,LINY=0,NPOINT=5$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$PO X=24.4, Y=0.0$
$PO X=24.4, Y=12.0$
$PO X=0.0, Y=12.0$
$PO X=0.0, Y=0.0$
$REG MAT=2,NPOINT=9$
$PO X=0.8, Y=0.0$
$PO X=3.4, Y=0.0$
$PO X=3.4, Y=8.8$
$PO X=21.0, Y=8.8$
$PO X=21.0, Y=0.0$
$PO X=23.6, Y=0.0$
$PO X=23.6, Y=11.4$
$PO X=0.8, Y=11.4$
$PO X=0.8, Y=0.0$
$REG MAT=1,CUR=3000.0,NPOINT=5$
$PO X=3.4, Y=0.0$
$PO X=3.4, Y=5.8$
$PO X=6.2, Y=5.8$
$PO X=6.2, Y=0.0$
$PO X=3.4, Y=0.0$
$REG MAT=1,CUR=-3000.0,NPOINT=5$
$PO X=18.2, Y=0.0$
$PO X=18.2, Y=5.8$
$PO X=21.0, Y=5.8$
$PO X=21.0, Y=0.0$
$PO X=18.2, Y=0.0$
$REG MAT=1,CUR=-0.0,NPOINT=5$
$PO X=6.4, Y=6.0$
$PO X=18.0, Y=6.0$
$PO X=18.0, Y=8.8$
$PO X=6.4, Y=8.8$
$PO X=6.4, Y=6.0$
$REG IBOUND=0,NPOINT=4$
$PO X=0.8, Y=0.0$
$PO X=0.8, Y=11.4$
$PO X=23.6, Y=11.4$
$PO X=23.6, Y=0.0$

```

Tab. 6.13: POISSON Eingabelisten für die ROSY-Korrekturmagneten

Durch die Festlegung der Höhe der Vakuumkammer auf 50 mm kann ROSY im Vergleich zu anderen Maschinen mit deutlich verringerter Erregung betrieben werden (Das Gap der Ablenkmagneten als Hauptenergieverbraucher wurde gegenüber ELETTRA beispielsweise um 25 % verringert).

Meßergebnisse zu den Vorbildern des Magnetdesigns für ROSY wurden an unterschiedlichen Stellen veröffentlicht ( s. z.B. [Li 92], [Ke 93], [Pe 93], [Ro 90], [Ta 93], [To 93], [Wa 93] und [Za 93] ). Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung zeigt, daß die Genauigkeit des Programmpakets POISSON für den Entwurf der Magnetstrukturen im hier dargestellten Rahmen ausreicht.

Die Wirkung der Abweichungen von den Vorgaben für die Magnete auf die Funktion der Maschine wird im Abschnitt 2.26 'Einfluß von Multipolfehlern auf die dynamische Apertur ' untersucht.

Damit ist die erste Etappe des Magnetfeldentwurfs für ROSY abgeschlossen. In der Fortführung der Arbeiten können die Ergebnisse von Rechnungen zum dynamischen Verhalten der Maschine in die Verfeinerung einbezogen werden und die Rechnungen auf den Einfluß der Feldränder (dreidimensionale Rechnungen) sowie die Untersuchung der Feldeigenschaften außerhalb der Mittelebenen der magnetischen Elemente ausgedehnt werden.

## 7 Hochfrequenzsystem

Das Hochfrequenzsystem realisiert sowohl die Beschleunigung der mit einer Energie von 800 MeV in den Speicherring ROSY injizierten Elektronen auf die geforderte Endenergie von 3 GeV als auch die ständige Kompensation des Energieverlustes der im Ring umlaufenden Elektronen, den diese durch Abstrahlung von Synchrotronstrahlung in den Dipolmagneten, Wiggler und Undulatoren erfahren. Dieser Energieverlust und die gewünschte Quantenlebensdauer des Strahles im Speicherring bestimmen im wesentlichen die Anforderungen an das Hochfrequenzsystem.

### 7.1 Anforderungen an das HF-System

Die für das HF System relevanten Parameter von ROSY sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Tabelle 7.1: Betriebsparameter zur Auslegung des HF-Systems von ROSY  
(\*: spätere Nachrüstung)

Nominelle Energie	$E_0$	[GeV]	3,0
Strahlstrom	$I_e$	[A]	0,1 (0,25)*
Momentum Compaction Factor	$\alpha$		$8,141 \times 10^{-3}$
Dämpfungszahl	D		-0,634
Dämpfungsfunktionen			
horizontal	$J_x$		1,634
vertikal	$J_y$		1
longitudinal	$J_z$		1,366
Energiebreite	$\Delta E/E$	[%]	1,5
Natürliche Energiebreite	$\delta E_{nat}$		$1,16 \cdot 10^{-3}$
Umfang des Speicherringes	C	[m]	148,1

Um die Leistungsbilanz für das Hochfrequenzsystem aufstellen zu können und technische Parameter für benötigte Cavities zu finden, wird zunächst die vom HF-System auf den Elektronenstrahl zu übertragende Leistung berechnet.

#### Mittlerer Energieverbrauch $eU_0$ je Umlauf

Der Synchrotronstrahlungsverlust  $eU_0$  pro Elektron und pro Umlauf in den Dipolmagneten mit einem mittleren Ablenkradius  $\rho_0$  bzw. die dafür charakteristische Umlaufspannung  $U_0$  berechnet sich wie folgt [Wi 92]:

$$eU_0 [keV] = 88,5 \frac{E_0^4 [GeV]}{\rho_0 [m]} \quad (7.1)$$

mit

$$\rho[m] = 3,33564 \frac{E_0[GeV]}{B[T]} \quad (7.2)$$

Für ROSY I ergibt sich mit einem mittleren Ablenkradius der Dipolmagnete von  $\rho=7,148m$  ein Energieverlust /Umlauf und Elektron von 1003 keV.

Für die Insertion Devices berechnet sich der Energieverlust zu:

$$eU_0[keV] = 0,633E^2[GeV]B^2[T]l_{ID}[m] \quad (7.3)$$

Mit dem Einbau von 4 Undulatoren ( $l_{ID}=3,5m$ ,  $B=0,46T$ ) und 5 Wigglern ( $l_{ID}=2,5m$ ,  $B=1,5T$ ) bei ROSY beträgt der Energieverlust/Umlauf aller Insertion Devices 177 keV.

Der gesamte Energieverlust/Umlauf und Elektron von 1180 keV erfordert eine vom HF System auf den in ROSY umlaufenden Elektronenstrahl zu übertragende HF Leistung

$$P_b = \frac{I_e U_0}{e} \quad (7.4)$$

von :  $P_b = 118 kW$  für  $I_e = 0,1A$  bzw.  $P_b = 295 kW$  für  $I_e = 0,25A$  in der ausgerüsteten Version.

Zusätzlich zu den Synchrotronstrahlungsverlusten müssen durch das HF-System die Verlustleistung der Cavities, die Leitungsverluste im Hohlleitersystem und die durch Anregung parasitärer Modi in den Cavities entstehenden Leistungsverluste aufgebracht werden. Diese Einflußfaktoren werden anschließend näher betrachtet.

## 7.2 Leistungsbilanz des HF-Systems

Für die HF Leistungsbilanz gilt:

$$P_{HF} = P_b + P_{CAV} + P_L + P_{HOM} \quad (7.5)$$

Unter der zunächst getroffenen Annahme, daß die Leitungsverluste  $P_L$  sowie die Verluste aufgrund parasitärer Modi  $P_{HOM}$  (HOM=Higher Order Mode) jeweils auf maximal 10% begrenzt werden können, ergibt sich näherungsweise:

$$P_{HF} \approx 1,2(P_b + P_{CAV}). \quad (7.6)$$

Hierbei bedeuten:	$P_{CAV}$ :	Cavity-Verlustleistung
	$P_L$ :	Leitungsverluste im HF-System
	$P_{HOM}$ :	HF-Verluste durch Anregung parasitärer Modi (higher order modi) in den Cavities
	$P_b$ :	Synchrotronstrahlungsverlustleistung



Die Cavity-Verlustleistung  $P_{CAV}$  ist die zum Aufbau der beschleunigend wirkenden elektrischen Spannung  $U_{cav}$  in der Shuntimpedanz  $R_s$  der Resonatoren in Wärme umgesetzte Wirkleistung:

$$P_{CAV} = \frac{U_{CAV}^2}{2R_s} \quad (7.7)$$

### 7.3 Überspannungsfaktor $q$ und Energieakzeptanz des HF-Systems

Die Cavityspitzenspannung  $U_{cav}$  ist um den Überspannungsfaktor  $q$  größer als die zur Deckung der Synchrotronstrahlungsverluste benötigte Umlaufspannung  $U_0$ .

$$U_{CAV} = q \frac{U_0}{e} \quad q: \text{Überspannungsfaktor} \quad (7.8)$$

Die Cavityverlustleistung steigt proportional zum Quadrat der Cavityspannung ( $U_{cav}^2$ ) und zur achten Potenz der Energie des Speicherringes ( $E_0^8$ ).

Für eine Quantenlebensdauer von  $\tau > 10$  h muß die Energieakzeptanz des HF-Systems  $\Delta E/E$  etwa  $10 \cdot \delta E/E$  betragen. Dies bedeutet, eine Energieakzeptanz der HF von etwa 1,5% sicherzustellen. Um dies zu gewährleisten, muß die in den Cavities aufzubauende Spitzenspannung  $U_{CAV}$  um den Überspannungsfaktor  $q = 1/\sin\varphi$  ( $\varphi =$  Phase der Beschleunigungsspannung) größer sein als die dem Energieverlust  $U_0$  entsprechende Amplitude der Beschleunigungsspannung. In der Tabelle 7.2 ist der Zusammenhang zwischen dem Überspannungsfaktor  $q$  und der erreichbaren HF-Energieakzeptanz sowohl für ein 500 MHz als auch ein 352 MHz Beschleunigungssystem zusammengestellt. Es gilt für die erreichbare Energieakzeptanz des HF-Systems:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \sqrt{k^* F(q)} \quad (7.9)$$

mit:  $F(q) = 2 \left[ \sqrt{q^2 - 1} - \arccos q^{-1} \right] \quad (7.10)$

und  $k^* = \frac{U_0}{\pi \alpha k E_0} \quad (7.11)$

Hierbei bedeuten:  $\alpha$ : Momentum Compaction Faktor  
 $k$ : Harmonischenzahl  
 $\Delta E/E$ : Energieakzeptanz der HF

Tabelle 7.2: Abhängigkeit der Energieakzeptanz der HF vom Überspannungsfaktor, dargestellt für ein 500 MHz (k=200) und ein 352 MHz (k=168) Beschleunigungssystem für ROSY.

q	$\arccos 1/q$	$\sqrt{q^2 - 1}$	F(q)	$\Delta E/E$ [%] k=200	$\Delta E/E$ [%] k= 168
1,4	0,775	0,979	0,408	0,49	0,59
1,6	0,896	1,249	0,706	0,65	0,78
1,8	0,982	1,497	1,029	0,79	0,94
2,0	1,047	1,732	1,370	0,91	1,08
3,0	1,231	2,828	3,194	1,39	1,65
4,0	1,318	3,873	5,110	1,76	2,09
5,0	1,369	4,899	7,060	2,07	2,46

Für das ROSY HF-Projekt wurde die Phase der Beschleunigungsspannung mit  $\varphi=20^\circ$  gewählt, entsprechend beträgt der Überspannungsfaktor  $q=2,92$ . Damit ist sichergestellt, daß die Energieakzeptanz des HF-Systems  $\Delta E/E \approx 1,65\%$  etwa zehnmal so groß wie die natürliche Energiebreite ist (siehe Tabelle). Für eine erwartete Strahllebensdauer von  $>10$  Stunden stellt dieser Wert einen vernünftigen Kompromiß zwischen der benötigten Energieakzeptanz und der dafür aufzubringenden HF-Leistung dar. Mit  $q=2,92$  und der berechneten Umlaufspannung von 1180 kV beträgt die notwendige Cavity-Spitzenspannung  $U_{cav} = 3446$  kV.

Bei der Injektion in ROSY ist durch genügende Leistungsreserve gewährleistet, daß die HF-Energieakzeptanz  $\Delta E/E_0$  mehrere Standardabweichungen der Energiebreite  $\sigma_e$  des injizierten Elektronenstrahles beträgt. Bei der Injektion ( $E = 800$  MeV) betragen beispielsweise  $U_0 = 5$  keV,  $P_b = 1,25$  kW ( $I_e = 0,25$  A). Die Realisierung eines Überspannungsfaktors von 20 bis 30 in der Injektionsphase ist üblich und realisierbar. Die zugehörige Energieakzeptanz liegt bei 5%.

## 7.4 Instabilitäten

Wenn ein Teilchenpaket durch einen Resonator fliegt, regt es in diesem resonante Felder an (als parasitäre Felder oder Higher Order Modes (HOMs) bezeichnet), die sich je nach der Güte der entsprechenden Mode eine gewisse Zeit im Resonator halten. Eine Abschätzung ist über den Abklingparameter  $\tau$  möglich, analog zum Grundmode [Ws 78].

$$\tau_{HOM} = \frac{T_b}{T_f} \quad (7.12)$$

mit:  $T_b$  = Zeit zwischen zwei Bunchen und  $T_f = 2Q_{\text{hom}}/2\pi f_{\text{hom}}$ .  $T_f$  ist die Cavityfüllzeit für einen entsprechenden Higher Order Mode,  $Q_{\text{hom}}$  die Güte dieses zugehörigen Modes.

Da bei einer Beschleunigungsfrequenz von 352 MHz alle 3 ns oder bei 500 MHz alle 2 ns ein Bunch beschleunigt wird, beeinflussen die angeregten parasitären Modi, deren Zeitkonstanten bis in den ms-Bereich reichen können, die Beschleunigung merklich. Die angeregten kollektiven Schwingungen in longitudinaler und transversaler Richtung führen zu einer Kopplung sämtlicher Pakete im Ring untereinander, deren Folge longitudinale und transversale Multibunch-Instabilitäten sind, die schnell zum Verlust des Strahles führen können. Um dies zu vermeiden, müssen die Güten  $Q_p$  der parasitären Moden gedämpft und damit die Zeitkonstanten  $\tau_p$  so klein gemacht werden, daß der Strahl stabil bleibt. Einen Schwellwert für die obere Grenze der Güten erhält man durch die von Balewski gefundene Beziehung für die Anwachsrate für longitudinale Multibunch-Instabilitäten [Fo 91]:

$$\delta_i = \frac{Z_p I \Omega_s}{2U_{\text{HF}} \cos \phi_s} h_m(x) \quad (7.13)$$

Darin bedeuten:

$Z_p = R_s f_{\text{HOM}}/f_{\text{HF}}$  mit

$R_s$ : Shunt-Impedanz

$f_{\text{HF}}$ : Frequenz der Grundmode

$f_{\text{HOM}}$ : Frequenz der parasitären Mode

$I$  Strahlstrom

$\Omega_s$  Synchrotronfrequenz

$U_{\text{cav}} \cos \phi_s$  fokussierender Teil der Cavityspannung

$\phi_s$  Synchrone Phase

$$x = \frac{\pi f_r L}{c}$$

mit  $L$  Bunchlänge

$h_m(x)$  Frequenzspektrum der m-ten Bunchmode  
( $m=1$ : Dipol,  $m=2$ : Quadrupol usw.)

Das Frequenzspektrum der m-ten internen Bunchmode bedeutet darin das Spektrum der möglichen Eigenschwingungen der Bunche. Die einzige natürliche Kompensation kollektiver Anregung von Multibunch-Instabilitäten ist in der Landau Dämpfung gegeben [Ko 90]. Bei longitudinalen Instabilitäten ist die Zeitkonstante der Landau-Dämpfung [Fo 91]:

$$\frac{1}{\tau_L} = \frac{\Omega_s}{64} \left( \frac{hL}{2R} \right)^2 \quad (7.14)$$

R ist darin der mittlere Maschinenradius und h die harmonische Zahl. Kompensation bedeutet, daß die Landau-Dämpfung größer oder gleich der Anwachsrate der Instabilitäten sein muß. Daraus folgt eine obere Grenze für die Impedanz einer parasitären Mode:

$$Zh_m(x) \leq \frac{U_{cav} \cos \phi_s}{32I} \left( \frac{hL}{2R} \right)^2 \quad (7.15)$$

Eine analytische Auswertung setzt voraus, daß neben den Maschinenparametern konkrete Cavitydaten (Resonanzfrequenzen) vorliegen. Für die Auswahl geeigneter Cavities für ROSY ist neben der Betrachtung zur HOM-Dämpfung die aus der Gleichung (7.15) ersichtliche Abhängigkeit des Schwellwertes der Impedanz vom Strahlstrom I wesentlich. Je höher der zu beschleunigende Strom I ist, umso größere Sorgfalt ist der Dämpfung der Güten parasitärer Resonanzen zu widmen.

Die Erfahrungen zeigen, daß bei einem einzelligen DORIS-Cavity (f=500 MHz) dieser Schwellwert bei etwa 500 mA [La93] und bei einem fünfzelligen LEP Cavity gegenwärtig bei 140 mA Strahlstrom liegt [La93].

## 7.5 Auswahl geeigneter Cavities

Bei der Auswahl geeigneter Cavities für ein neues Projekt, wie es ROSY darstellt, werden zunächst die in den etablierten SR Projekten erprobten Cavities für ihre Eignung näher betrachtet und bezüglich ihrer Parameter verglichen. In der Tabelle 3 sind einige wichtige Parameter von Cavities mit ihren jeweils projektbezogenen Parametern zusammengestellt:

Tabelle 7.3: Cavityparameter, wobei die Angaben aus den jeweiligen Design Reports entnommen wurden.

Der Index 1 ( $R_{s1}$ ) bezieht sich auf jeweils eine Zelle bei mehrzelligen Cavities.

(\*) : Beim fünfzelligen LEP cavity ist nur ein Koppelfenster vorhanden.

Untersuchungen müssen zeigen, ob eventuell das vorhandene zweite Koppelfenster zum LEP-Speichercavity auch zur direkten Einkopplung geeignet ist.

CAVITY	ALS	ELETTRA	DORIS	APS	PETRA-7	LEP/ESRF
f [MHz]	500	500	500	352	500	352
$R_{s1}$ [M $\Omega$ ]	8	7	2,9	5,6	2,7	5,66
$R_{sc}$ [M $\Omega$ ]	8	7	2,9	5,6	19,0	28,3
$U_{cav}$ [kV]	750	650	530	625	1950	2660
$P_{cav}$ [kW]	35	30	48,4	82	100	125
HF-Fenster	1	1	1	1	1	2*

Mit den ROSY Parametern:  $E=3\text{GeV}$ ,  $I_e=0,1\text{A}$ ,  $P_b=118\text{ kW}$  und  $U_{cav}=3446\text{ kV}$  ( $q=2,92$ ) ergeben sich theoretisch folgende Betriebsparameter für diese Cavities, wenn sie für ROSY eingesetzt werden:

Tabelle 7.4: Betriebsparameter von Cavities bei deren Einsatz im ROSY HF-System. Hierbei beziehen sich die mit (1) indizierten Größen auf jeweils ein Cavity.

(\*): zwei Koppelfenster benutzt,

CAVITY	ALS	ELETTRA	DORIS	APS	PETRA-7	LEP- 5
	EINZELLER			MEHRZELLER		
n-Cavity	6	6	6	4	2	2
$U_{c1}$ [kV]	574	574	547	862	1723	1723
$P_{c1}$ [kW]	20,6	23,5	56,8	37,1	78,1	52,5
$P_{b1}$ [kW]	20	20	20	29,5	59	59
$P_{HF1}$ [kW] +10%HOM	44,7	47,9	84,5	73,3	150,8	122,7
$P_{win}$ [kW]	44,7	47,9	84,5	73,3	150,8	122,7
$P_{HF-PA}$ [kW]+20%	295	316	558	320	332	270

Bei  $I_e = 0,25$  A, entsprechend  $P_b = 295$  kW betragen die zugehörigen Betriebsparameter:

$P_{b1}$ [kW]	49,2	49,2	49,2	73,8	147,5	147,5
$P_{HF1}$ [kW] +10%HOM	76,8	80	116,6	122	248	220
$P_{win}$ [kW]	76,8	80	116,6	122	248	110*
$P_{HF-PA}$ [kW]+20%	507	528	759,6	532	546	484

## 7.6 Diskussion

### 7.6.1 Beschleunigungssystem mit einzelligen Cavities

Die Vorteile eines verteilten, redundanten Beschleunigungssystems aus einzelligen Cavities bestehen unter anderem darin, das System in zwei bzw. drei Einzelsysteme teilen zu können, so daß bei Ausfall eines der HF-Systeme der Strahlbetrieb mit eingeschränkten Strahlparametern aufrechterhalten

werden kann. Außerdem hat die bisherige Praxis an den existierenden Anlagen gezeigt, daß die Unterdrückung nicht erwünschter Modi durch die bessere Entkopplung der einzelnen Cavities voneinander weniger problematisch ist. Nach Erfahrungen im LEP/CERN ist die mit einzelligen Cavities erreichbare Stromstärke im Ring um etwa den Faktor zwei größer, als dies mit einem vergleichbaren Beschleunigungssystem, bestehend aus fünfzelligen Cavities, möglich ist. Hier werden auch die Erfahrungen bei der ESRF einfließen, wo gegenwärtig bei Strömen größer 140 mA Probleme mit Multibunch-Instabilitäten auftreten. Aus Gleichung (7.15) (Kapitel 7.4) ist ersichtlich, daß die Anforderungen zur Dämpfung der Güte parasitärer Resonanzen linear mit dem Strahlstrom steigen. Bei mehrzelligen Cavities liegen diese parasitären Resonanzen durch die enge Kopplung der Resonatorzellen oft so dicht beieinander, daß die Gütedämpfung und die Verschiebung der parasitären Resonanzen problematisch wird.

Als weitere Kriterien für den Einsatz eines verteilten Systems bei ROSY kämen die mögliche Verfügbarkeit von Komponenten und der benötigte Einbauplatz innerhalb des Speicherringes hinzu. Da bei ROSY alle verfügbaren geraden Stücken mit Wigglern und Undulatoren bestückt werden sollen, wäre die Realisierung eines HF-System mit Einzellern mit Kompromißforderungen an das gegenwärtige Layout des Ringes verbunden, da längere gerade Stücken erforderlich sind.

Seitens der verglichenen Cavityparameter sind für ROSY ein Beschleunigungssystem, bestehend aus sechs ALS- oder ELETTRA-Cavities denkbar, wenn eine Beschleunigungsfrequenz von 500 MHz gewählt wird. Bei der geplanten Aufrüstung zur Beschleunigung eines Elektronenstromes von 250 mA muß die thermische Belastung der Cavities nachgerechnet werden. Bei einer Beschleunigungsfrequenz von 352 MHz bietet sich ein System aus vier APS-Cavities an, wobei für die Beschleunigung eines Stromes von 250 mA und eventuell darüber auch sechs Cavities verwendet werden sollten.

### 7.6.2 Beschleunigungssystem mit mehrzelligen Cavities

Die mehrzelligen Cavities sind in die projektierte Struktur von ROSY einfacher einzufügen, da zwei gerade, benachbarte Strecken in der derzeitigen Konzeption eine sehr kompakte Anordnung des Gesamtsystems ermöglichen. Von den drei verglichenen Systemen wäre das siebenzellige PETRA-Cavity bei  $I_e=100$  mA gerade noch einsetzbar, darüberhinaus ist das Koppelfenster überlastet. Das ESRF-Cavity (LEP-Design) verfügt über zwei Koppelfenster, wobei bei Vollast ( $I_e=250$  mA) jedes eine Durchgangsleistung von 110 kW übernehmen muß. Verglichen mit den LEP und ESRF Betriebsparametern werden bei ROSY die Cavities noch nicht an den Leistungsgrenzen betrieben. Für die Beschleunigung eines Stromes von 250 mA muß mit Problemen durch Multibunch-Instabilitäten gerechnet werden. Vor dieser Entscheidung sind hierzu weitere Detailbetrachtungen erforderlich. Ein HF System, basierend auf dem LEP Cavitydesign ist dennoch aus gegenwärtiger Sicht für ROSY die wohl günstigste Lösung, zumal durch die Umrüstung des LEP Speicherringes im

CERN auf supraleitende Cavities eventuell zwei nicht mehr benötigte LEP Cavities beschaffbar wären [Ha 93].

### 7.6.3 Zusammenfassung

Es wird aus gegenwärtiger Sicht empfohlen, für ROSY ein HF-System mit zwei LEP Cavities zu realisieren. Dabei sind folgende Betriebswerte zu erwarten:

Tabelle 7.5: Betriebswerte für das empfohlene ROSY Hochfrequenzsystem, ausgerüstet mit zwei LEP-Cavities.

Anzahl der benötigten Cavities	2
Betriebsfrequenz	352 MHz
Harmonischenzahl $k$	168
Shuntimpedanz (ein Cavity) $R_{S1}$	28,3 M $\Omega$
Cavityspitzenspannung $U_{cav1}$ für $q=2,92$ , $\varphi=20^\circ$ , $U_0=1180$ kV	1723 kV
Cavityverlustleistung $P_{cav1}$	52,5 kW
<b>Betriebswerte für <math>I_e=0,1A</math>:</b>	
Strahlleistung (je Cavity) $P_{b1}$	59 kW
Gesamte in ein Cavity einzuspeisende HF Leistung $P_{HF1}$ (+10%)	122,7 kW
Koppelfensterdurchgangsleistung $P_{win}$	122,7 kW
HF Output des Klystrons $P_{HF-PA}$ (+20%)	270 kW
<b>Betriebswerte für <math>I_e=0,25A</math>: (2 Koppelfenster)</b>	
Strahlleistung (je Cavity) $P_{b1}$	147,5 kW
Gesamte in ein Cavity einzuspeisende HF Leistung $P_{HF1}$ (+10%)	220,0 kW
Koppelfensterdurchgangsleistung $P_{win}$	110,0 kW
HF Output des Klystrons $P_{HF-PA}$ (+20%)	484,0 kW

Die Zusammenstellung zeigt, daß für einen Strom von  $I_e=0,1$  A ein LEP-Cavity von der zu übertragenden Leistung her ausreichend wäre. Nicht ausreichend ist die mit einem Cavity zu erzielende Cavity-Spitzenspannung von 2660 kV. Betreibt man ROSY anfangs (oder im Falle eines Defektes an einer Cavity) mit nur einer Cavity, so verringert sich der Überspannungsfaktor auf  $q=1,29$ . Damit verschlechtert sich die zu erwartende Energieakzeptanz auf  $\Delta E/E=1,0$  %. Dies sollte zumindest am Anfang ausreichend sein.

Betreibt man die Cavities mit den ESRF-Projektparametern ( $U_{cav1}=2660$  kV), so ist für ROSY ein Überspannungsfaktor von  $q=4,5$  möglich, woraus sich eine Energieakzeptanz von etwa  $\Delta E/E=2,2\%$  ergibt.

## 7.7 Schaltungsbeschreibung

### 7.7.1 Leistungsteil

Das Blockschaltbild vom Leistungsteil des ROSY Hochfrequenzsystems ist in Abb. 7.1 skizziert. Als Klystron findet der Typ YK1350 (Philips) oder TH 2089 (Thomson CSF) Anwendung, wobei die benötigte Ausgangsleistung von knapp 500 kW die Anforderungen an die Konditionierung des Klystrons ( $P_{\text{out}} = 1 \text{ MW}$ ) erheblich reduzieren.

Der dem Klystron nachgeschaltete Zirkulator dämpft auftretende Reflexionen um mehr als 30 dB (1000-fach) und vermeidet eine Überlastung des Klystron-Auskoppelfensters sowie des Klystron-Kollektors bei derartigen Fehlanpassungen. Zur symmetrischen Leistungsaufteilung auf die beiden Hohlleitersysteme zu den Cavities dienen jeweils Leistungsteiler (3-dB Koppler in Hohlleiterausführung als magisches-T), wobei die angeschlossenen Absorber (T) jeweils 50 % der von den Cavities reflektierten Leistung bei Fehlanpassung aufnehmen müssen. Die Absorber werden für die volle Leistung im jeweils nachfolgenden Zweig (max. Reflexion) dimensioniert, um im Testfall anstelle der Cavities Kurzschlußplatten an den Hohlleiterausgängen anbringen zu können.

### 7.7.2 Steuerteil

Im Blockschaltbild (Abb. 7.2) sind sowohl die Baugruppen zur Klystronansteuerung als auch die Amplituden- und Phasenregelkreise des Systems skizziert.

Der Master-Oszillator liefert ein amplituden- und phasenstabiles Ausgangssignal mit einer Frequenzstabilität von  $10^{-7}$  und einer Ausgangsleistung von 10 dBm (10 mW/50  $\Omega$ ). Im Splitter und (nicht gezeichneten Pufferverstärkern) werden zu Meß- und Kontrollzwecken weitere Referenzsignale abgezweigt. Dem Splitter folgt ein elektronischer Phasensteller, der die Bezugsphase des HF-Systems bezüglich des Injektors definiert. Im Signalweg folgt nach dem pick-up ein weiterer elektronischer Phasensteller als Stellglied des "äußeren" Regelkreises zur Stabilisierung der HF Spannung in den Cavities. Eine gleichartig aufgebaute Phasenregelkreis als innere Regelschleife stabilisiert die Phase des Verstärkerzweiges bis einschließlich Klystronaustritt (Klystron Phase-Feedback). Dieser Regelkreis wird erst aktiviert, wenn die Sollwerte der Betriebsspannungen des Klystrons erreicht sind, da die Phase des HF Signales im Klystron beim Verändern der Kathodenspannung um mehrere Grad pro kV gedreht wird.

Der im Signalweg folgende Linearverstärker hebt den Signalpegel um etwa 20 dB, um den Treiber voll auszusteuern. Der PIN-Diodenschalter dient der schnellen HF-Abschaltung im Havariefall. Der Treiber verfügt über eine Regelschleife zur Stabilisierung seiner Ausgangsleistung; außerdem läßt sich über die dort eingreifende AGC (Automatische Verstärkungsregelung) eine



Leistungsfeinregelung des Klystrons vornehmen. Eine effiziente Regelung der Klystron-Ausgangsleistung inclusive einer Tastung wird über die fast leistungslos zu steuernde Modulationsanode des Klystrons erreicht. Während bei der Reduzierung der Ansteuerleistung durch die Treiberregelung ständig die volle Kollektorleistung dissipiert wird, kann die Kollektorbelastung durch Regelung der Modulationsanodenspannung im Bedarfsfall erheblich reduziert werden. Die der HF-Leistung proportionale Stellgröße wird dem Summenpunkt des Isolationsverstärkers zugeführt.

ist in  
2089  
napp  
MW)

onen  
stron-  
tigen  
eiden  
ppler  
enen  
g bei  
volle  
m im  
ngen

zur  
des

biles  
einer  
nicht  
itere  
scher  
ktors  
scher  
g der  
kreis  
bis  
kreis  
trons  
n der

etwa  
t der  
eine  
sich  
eine

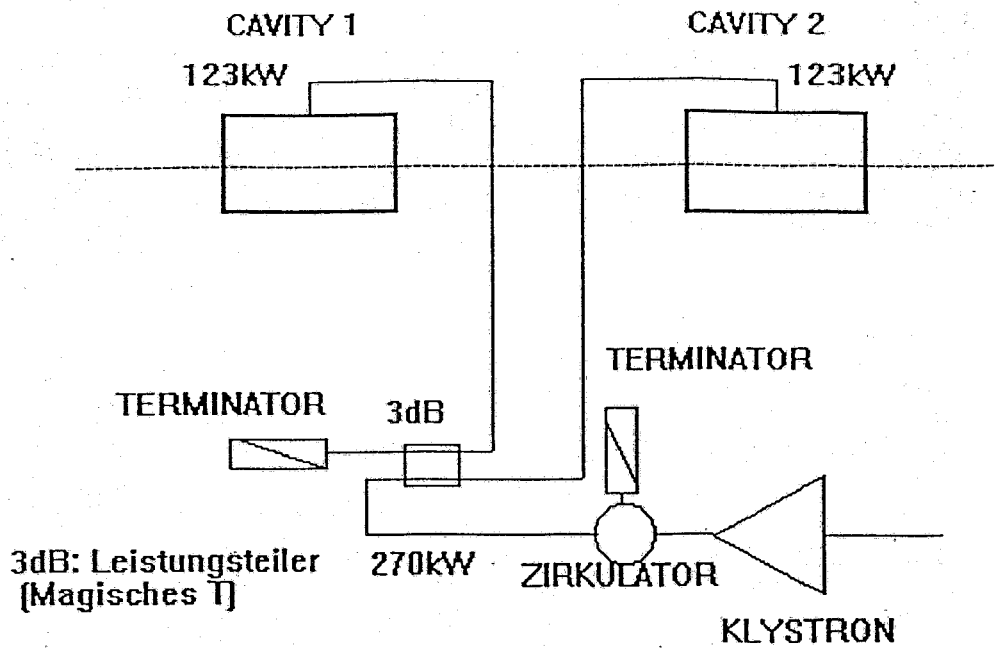


Abb. 7.1 a: HF-Leistungsteil für die Beschleunigung von  $I_e = 100 \text{ mA}$

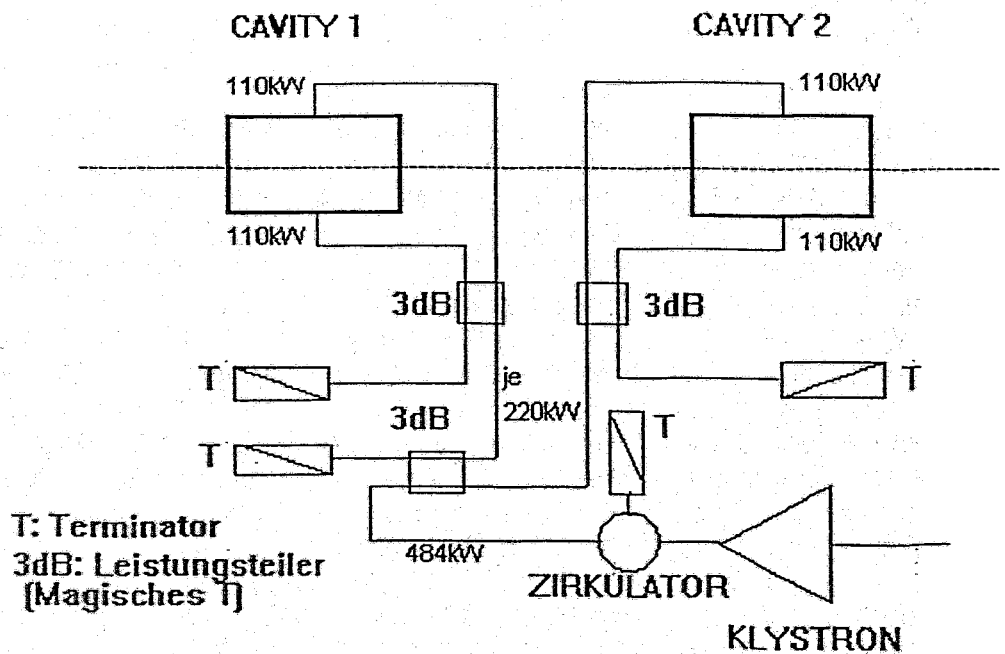


Abb. 7.1 b: HF-Leistungsteil für die Beschleunigung von  $I_e = 250 \text{ mA}$





## 8 Netzgeräte und Energieversorgung

### 8.1 Netzgeräte (Power Supplies) - Prinzipien und Wirkungsweise

#### 8.1.1 Allgemeine Anforderungen

Für eine sichere und präzise Strahlführung im Speicherring werden hochkonstante magnetische Felder benötigt, die außerdem zu jeden Zeitpunkt in den Dipol-, Quadrupol- und Sextupolmagneten jeweils gleiche relative Flußdichten aufweisen sollen. Geht man davon aus, daß die Magnete gleichartig aufgebaut sind, dann ergeben sich gleiche Flußdichten, wenn alle Magnete einer Gruppe vom gleichen Strom durchflossen werden. Dies erreicht man durch Reihenschaltung der einzelnen Magnetgruppen und Versorgung von jeweils einen Power-Supply.

Um die notwendigen Güterwerte der magnetischen Felder zu erreichen, werden an die zur Versorgung der Magnete eingesetzten Power Supplies folgende Grundanforderungen gestellt:

- Langzeitinstabilität [8h]  $\leq$  0,002....0,005%
- Restwelligkeit [300Hz]  $\leq$  0,01%
- Restwelligkeit [ 50Hz]  $\leq$  0,005%
- Einstellbarkeit d. Stromes  $\leq$  0,002%
- integrale  
Nichtlinearität d. Rampe = 0,01%

Bei einer Injektionsenergie von 800 MeV, muß zum Beschleunigen auf die Endenergie von 3 GeV, der Strom von  $0,26 \cdot I_n$  auf  $1 \cdot I_n$  ( $I_n$  = Nennstrom der einzelnen Stromkreise) rampenförmig erhöht werden können. Die dabei auftretenden Abweichungen zwischen den einzelnen Stromkreisen sollten ebenfalls  $< 0,01\%$  sein. Nimmt man an, daß die Zeit für den Anstieg 10 s beträgt, dann muß die Startzeit aller Power Supplies auf 1 ms genau vom Kontrollsystem vorgegeben werden. Bei serieller Übertragung bedeutet das, daß ein spezielles Startsystem implementiert werden muß. Der Stromanstieg in den Magneten sollte, bei vertretbarem Aufwand, möglichst schnell erfolgen. Die größte Anstiegsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Induktivität des Magneten und der vom Power-Supply zur Verfügung gestellten maximalen Spannung.

In den Leistungsteilen ist für einen guten Wirkungsgrad Sorge zu tragen. Entstehende Leistungsverluste sind nach Möglichkeit vollständig durch Wasserkühlung abzuführen (alle Leistungsbaulemente sowie Transformatoren und Drosseln), Lüfter sollten nach Möglichkeit vermieden werden. Für die genaue Messung des Magnetstromes sollten präzise Gleichstromwandler (DCCT) eingesetzt werden. Diese messen den Strom, im Gegensatz zu den bekannten Shunts, mit hoher Genauigkeit bei minimalen Leistungsverbrauch. Derartige Wandler werden von der Industrie bis zu mehreren Kiloampere angeboten. Für einen sicheren Betrieb sollten stets zwei unabhängige Wandler eingesetzt

- Als Folge des Phasenanschnitts eilt der Strom der Spannung nach, was zu einer Verschlechterung des Leistungsfaktors führt. Es müssen zusätzliche Phasenschieberkondensatoren angeordnet werden, um den Blindstrom in erträglichen Grenzen zu halten.
- Änderung der Stromanstiegsgeschwindigkeit, wie sie zum Beispiel beim Übergang aus dem Konstantstrombetrieb in einen rampenförmigen Stromanstieg auftreten, bewirken einen Spannungssprung an der Induktivität und als Folge davon Ausgleichsvorgänge beim Strom. Diese können dazu führen, daß der Strahl verloren geht. Vermindern kann man dies, indem man harte Sollwertänderungen vermeidet (Weichschaltung  $I_{soll} = f(t^3)$ ). (siehe Abb. 8.3)

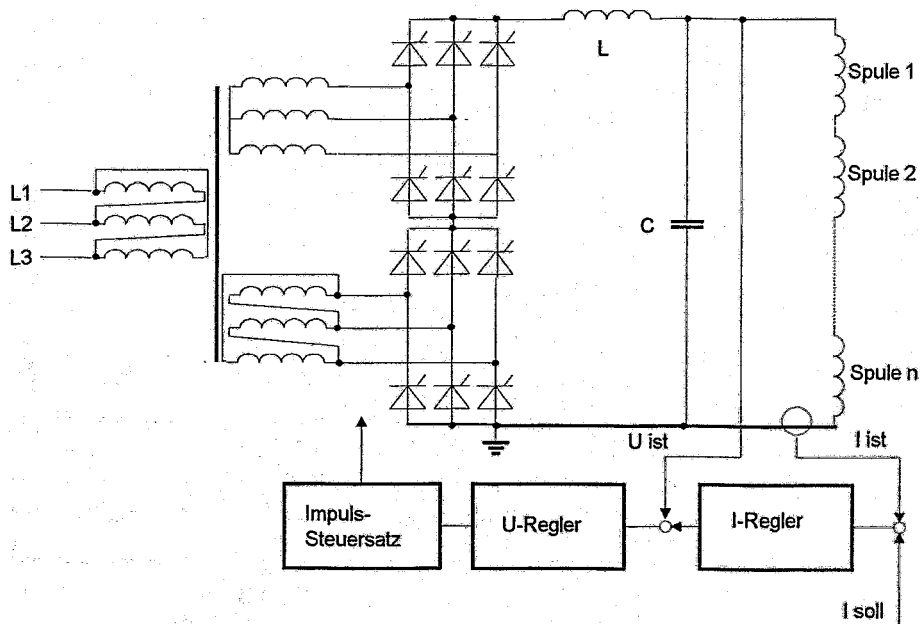


Abb. 8.2: Stromregelung durch Phasenanschnitt

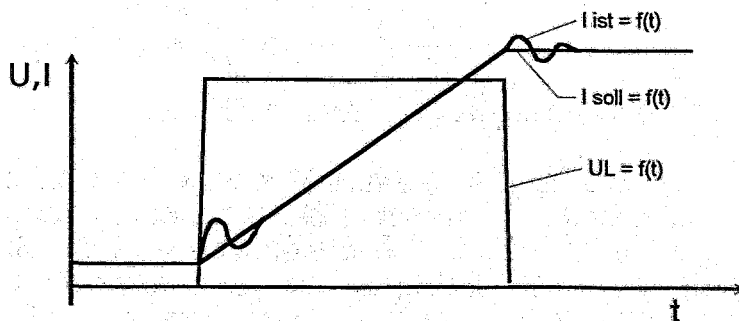


Abb. 8.3: Verlauf von Strom und Spannung

werden, wobei einer zur Istwertgewinnung für den jeweiligen Regler, und einer zur Bereitstellung des aktuellen Stromwertes für das Kontrollsystem verwendet werden sollte [Ri 90].

In Abb. 8.1 ist die Anordnung der einzelnen Magnete eines Achromaten des Speicherringes symbolisch dargestellt.

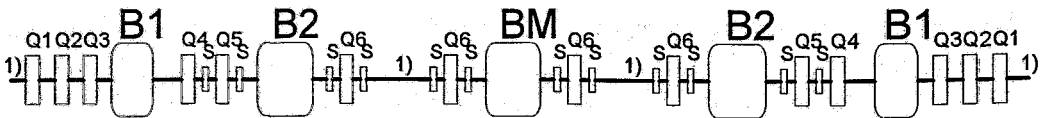


Abb. 8.1: Anordnung der Magnete eines Achromaten 1) Insertion Devices

Für den Aufbau der Stromversorgungseinrichtungen gibt es 3 geeignete Prinzipien, deren Vor- und Nachteile in den nachfolgenden Abschnitten einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

### 8.1.2 Stromregelung mit Thyristorstellgliedern

Die nahezu schon klassische Art der Stromregelung besteht darin, durch Phasenanschnitt einer meist mehrpulsigen Stromrichterschaltung (6...24-pulsig) die Verstellung der Gleichströme zu erreichen. Diese Art der Schaltung, im Abb. 8.2 dargestellt, eignet sich für Ströme bis zu mehreren tausend Ampere. Sie ist einfach und zuverlässig und der Wirkungsgrad ist verhältnismäßig hoch (>80%). Der Stellbereich reicht ohne Schwierigkeiten von 0,1...1·In. Sie besitzt aber einige gravierende Nachteile, die ihren Einsatz begrenzen bzw. erschweren.

- Bedingt durch den Phasenanschnitt ist die Welligkeit sehr hoch. Sie muß nachfolgend durch passive bzw. aktive Filter auf das zulässige Maß gebracht werden. Dies setzt sehr große Induktivitäten und Kapazitäten voraus. Besonders störend wirken sich dabei Welligkeiten von 50 Hz aus, wie sie auch bei mehrpulsigen Schaltungen, durch Unsymmetrien im speisenden Netz und durch zeitliche Unterschiede der Steuerpulse entstehen können. Alle Hersteller und Betreiber dieser Anlagen unternehmen große Anstrengungen um derartige Einflüsse auszuschalten.
- Als Folge der großen Filter ist die Regelung sehr langsam. Schnelle Änderungen des Stromes, hervorgerufen durch äußere Störungen können nicht ausgeregelt werden. Das optimale Regelprinzip ist eine schnelle Spannungsregelung mit überlagerter langsamer Stromregelung.
- Durch den raschen Stromanstieg beim Anschchnitt, der nur durch die Streuinduktivität des Leistungstransformators begrenzt wird, bilden sich starke magnetische Störfelder, die nur durch aufwendige Filter vom speisenden Netz ferngehalten werden können. Verschiedene Einrichtungen (z.B. DESY) verwenden dafür ein spezielles Netz, nur für die Power-Supplies, um die Störungen über den Transformatoren und Leitungsinduktivitäten abklingen zu lassen.

Ein verbessertes Verfahren ist die nachfolgende lineare Verstärkung des Stromes durch Transistorblöcke (parallelgeschaltete Bipolar- oder MOS-Transistoren). Der Vorteil dieser Schaltung ist, daß durch eine sehr schnelle Stromregelung (P-Regler mit hoher Verstärkung, Regelstrecke in Näherung 1. Ordnung) die Welligkeit sehr klein gehalten werden kann und das Änderungen des Stromanstieges ohne merkliche Ausgleichsvorgänge erfolgen. Sie eignet sich besonders für hochgenaue Stromregler bis zu einigen hundert Ampere. Um die Verlustleistung am Transistorstellglied möglichst gering zu halten wird mit Hilfe des Thyristorreglers die Spannung  $U_{CE}$  stets auf einen möglichst kleinen Wert ( $U_{CE} = 5 \dots 10V$ ) gehalten. Das Prinzip ist in Abb. 8.4 dargestellt.

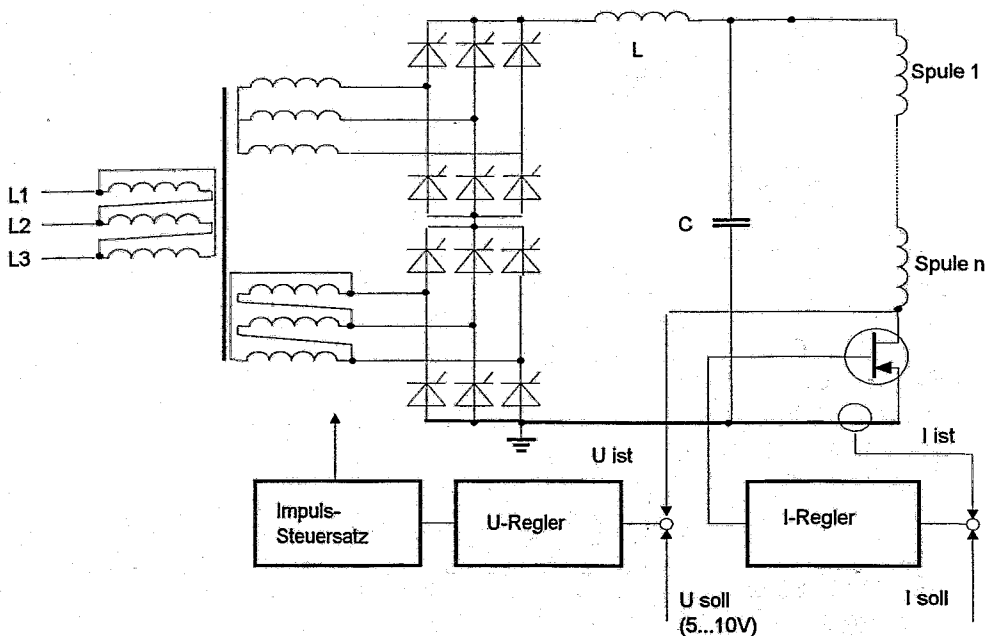


Abb. 8.4: Stromregelung durch lineare Verstärkung, Spannungsnachführung durch Phasenanschnitt

### 8.1.3 Stromregelung durch Pulsweitenmodulation (PWM)

Das zweite, modernere Verfahren den Strom in weiten Grenzen möglichst verlustarm zu verändern, ist das bei kleineren Strömen allgemein angewandte Prinzip der Pulsweitenmodulation. Bei diesen Verfahren wird, im Gegensatz zur Phasenanschnittssteuerung mit Thyristoren, eine wesentlich höhere Schaltfrequenz gewählt. Da man von einer Gleichspannung ausgeht, entfällt die Selbstlöschung der Thyristoren im Nulldurchgang der Wechselfspannung und es müssen Schaltelemente zum Einsatz kommen, die ein- und ausschalten können. In diesen Leistungs- und Frequenzbereich kommen dafür nur Power-Mosfets und IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) infrage. In Abb. 8.5 ist



das Prinzip dargestellt. Da die Netztrennung durch den Leistungstransformator erfolgt, kann die einfachste Schaltung, ein Drosselwandler (Buck-Converter) eingesetzt werden. Ausgehend von einer Gleichspannung die mit Hilfe einer ungesteuerten 6-Puls Brückenschaltung bereitgestellt wird, erfolgt die Verstellung des Gleichstromes durch periodisches Ein- bzw. Ausschalten des Transistors. Dazu schaltet man eine Vielzahl von Transistoren und Dioden parallel, um den notwendigen Gleichstrom schalten zu können. Während der Einschaltphase wird in der Drossel Energie gespeichert, die in der Ausschaltphase über die Diode den Strom durch den Verbraucher weiterfließen läßt. Um die Speicherdrossel klein halten zu können, müssen hohe Frequenzen gewählt werden. Im Kleinleistungsbereich liegen diese bei 100 kHz. In den hier benötigten Leistungsbereichen erreicht man Werte um 20 kHz. Von der Industrie werden heute Geräte bis ca. 300 kW angeboten, die nach diesen Verfahren arbeiten.

Die Vorteile dieser Schaltung sind:

- Geringere Welligkeit (Restwelligkeit der Schaltfrequenz läßt sich besser entfernen) 50Hz-Komponente läßt sich noch ausregeln.
- Die Siebglieder sind durch die hohe Frequenz kleiner und leichter.
- Durch die ungesteuerte Gleichrichtung ist die Netzurückwirkung bzw. der Leistungsfaktor günstiger.

Um die Schaltverluste im Transistor und der Diode klein zu halten, müssen sehr schnelle Leistungsbaulemente eingesetzt werden, die innerhalb von einigen hundert Nanosekunden den Strom ein- bzw. ausschalten. Das hat zur Folge, daß an Leitungsinduktivitäten sehr hohe Transienten entstehen, die einen gewissen Aufwand an Entstörmaßnahmen notwendig machen, um die Anlagen EMV-gerecht aufbauen zu können.

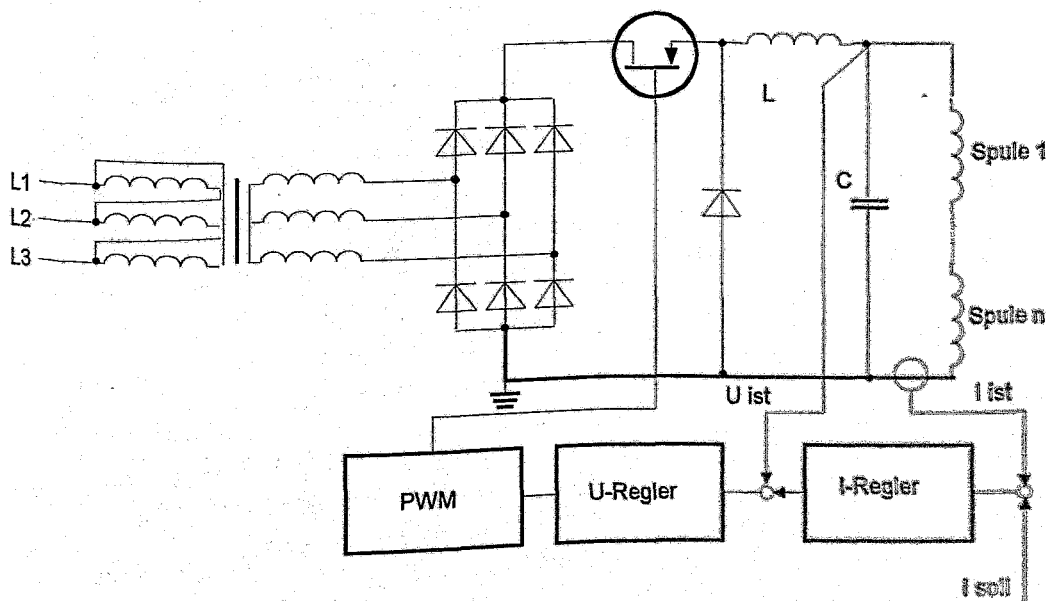


Abb. 8.5: Stromregelung durch PWM

### 8.1.4 Stromregelung durch PWM ohne Netztransformator

Im Gegensatz zur der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Schaltung erfolgt hier das unmittelbare Schalten der gleichgerichteten und geglätteten Netzspannung. Statt der Drossel wird ein Übertrager eingesetzt, der die notwendige Netztrennung realisiert. Die Schaltungsart wird heutzutage bei fast allen Kleinleistungsnetzgeräten angewendet. Bei größeren Leistungen ( $>10\text{kW}$ ) kommen fast ausschließlich Brückenwandler zum Einsatz, die eine gute Ausnutzung des Übertragers garantieren. Es werden heutzutage Geräte bis ca.  $100\text{ kW}$  angeboten. Das Schaltungsprinzip ist in Abb. 8.6 dargestellt. Der Vorteil dieser Schaltung liegt darin, daß der teure und schwere Netztransformator entfallen kann. Durch das Fehlen dieses Transformators mit seiner dämpfenden Wirkung, müssen allerdings umfangreiche Maßnahmen ergriffen werden, um die Geräte EMV-gerecht aufzubauen. Sie müssen einerseits garantieren, daß keine Störsignale ins Netz gelangen und daß andererseits die Geräte nicht durch energiereiche Spannungsspitzen, wie sie im Netz zum Beispiel beim Abschmelzen einer Sicherung auftreten können (VDE0160), zerstört werden.

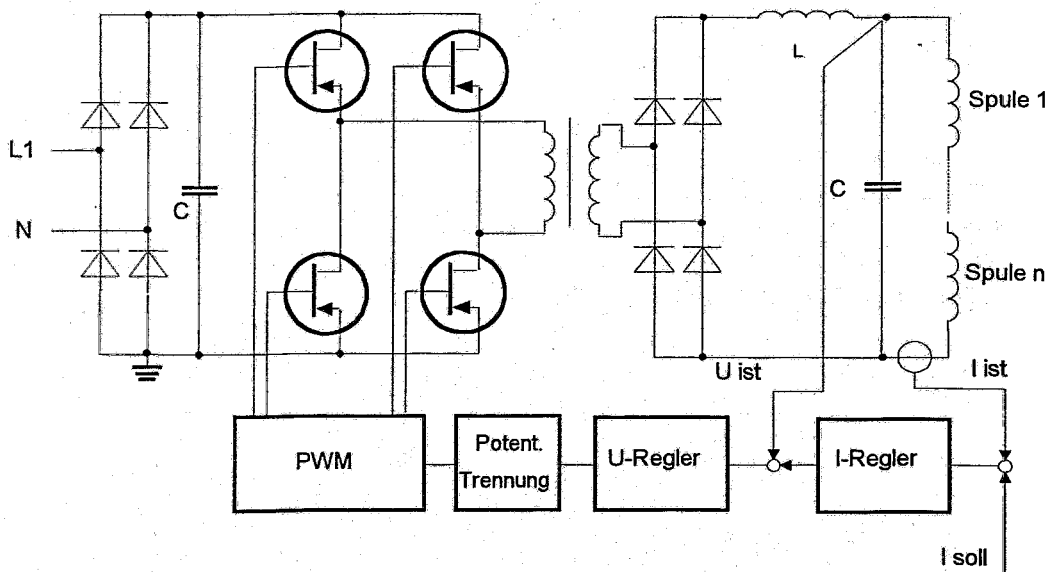


Abb. 8.6: Stromregelung durch PWM ohne Netztransformator

### 8.1.5 Auswahl der geeigneten Verfahren für ROSY

In den vorherigen Abschnitten sind verschiedene Verfahren dargestellt die für die einzelnen Stromversorgungsaufgaben mehr oder weniger gut geeignet sind. In der folgenden Tabelle 8.1 sind die einzelnen Stromkreise und das dafür geeignete Schaltungsprinzip aufgelistet. Die Auswahl hängt davon ab, ob zum Zeitpunkt der Errichtung der Anlage geeignete Geräte von der Industrie zur Verfügung gestellt werden können. Durch die rasche Entwicklung auf dem Gebiet der leistungselektronischen Bauelemente können schon heute Geräte

hergestellt werden, die vor Jahren in diesen Leistungsbereich undenkbar waren.

Tab. 8.1: Leistungsbedarf der Magnete und vorgesehene Schaltungsprinzip der Netzgeräte

Power-Supply für			Technische Daten			Schaltungsprinzip
			U	I	P	
B1	8	Dipol-Magn.	184 V	1293 A	238 kW	nach Abb. 8.2
B2	12	Dipol-Magn.	353 V	1293 A	456 kW	nach Abb. 8.2
Q1	8	Quadrupole	49 V	154 A	8 kW	nach Abb. 8.5
Q2	8	Quadrupole	111 V	262 A	29 kW	nach Abb. 8.5
Q3	8	Quadrupole	51 V	200 A	10 kW	nach Abb. 8.5
Q4	8	Quadrupole	62 V	246 A	15 kW	nach Abb. 8.5
Q5	8	Quadrupole	83 V	261 A	22 kW	nach Abb. 8.5
Q6	16	Quadrupole	132 V	261 A	35 kW	nach Abb. 8.5
SV	8+16	Sextupole	144 V	200 A	29 kW	nach Abb. 8.5
SH	24	Sextupole	144 V	200 A	29 kW	nach Abb. 8.5

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stellen, unter anderen, nachfolgend aufgeführte Unternehmen geeignete Stromversorgungs - sowie Strommeßeinrichtungen zur Verfügung.

Brucker	Magnet Power Supplies , Präzisions Power Supplies DCCT Meßeinrichtungen
Danfysik	Magnet Power Supplies System 8000      5...300 kW DCCT Meßeinrichtungen
fug	Stromversorgungseinrichtungen allgemeiner Art mittlerer Leistung
Foeldi	Magnet Power Supplies (nach Kundenwunsch) DCCT Meßeinrichtungen
Holec	Magnet Power Supplies
Siemens	Magnet Power Supplies , Hochspannungsanlagen Nieder- und Mittelspannungsverteilungen

## 8.2 Anschluß der Magnete an die Netzgeräte

Beim Anschluß der Magnete an die Netzgeräte sind die nachfolgenden Bedingungen einzuhalten.

- Die Leitungen sollten so kurz wie möglich sein, um die Leistungsverluste klein zu halten.

- Für die großen Ströme sind mehrere parallele Leitungen vorzusehen. Die Anzahl richtet sich nach dem für die Leitung zulässigen Strom. Eine großzügige Auslegung erhöht zwar die Errichtungskosten, senkt aber gleichzeitig die Erwärmung und verringert die Betriebskosten. Vorzugsweise sollte eine einheitliche Leitung für alle Verbindungen verwendet werden. Das vereinfacht die Beschaffung und die Konfektionierung (Anquetschen der Kabelschuhe). Für alle Verbindungen am Speicherring ROSY wird eine mehrdrähtige Starkstromleitung NYY-O 1x 185 mm<sup>2</sup> vorgesehen. Bei Bündelverlegung (<10) kann diese mit ca. 250 A belastet werden. In Tab. 8.2 ist die notwendige Leitungslänge aufgelistet. Für flexible Anschlußleitungen sollte eine viel- oder feindrähtige Leitung 1 X 120 mm<sup>2</sup> verwendet werden.
- Die Leitungen sind so zu verlegen, daß die magnetischen Felder der Ströme keinen Einfluß auf die Beamline haben (z.B. hinter dem Magnetjoch). An den magnetfreien Stellen am Ring hat das vom Strom erzeugte Feld unmittelbaren Einfluß und kann zu erheblichen Problemen führen. In Abb. 8.7 ist der Feldverlauf, hervorgerufen durch einen Strom von 1200 A im Leiter ohne Kompensation dargestellt. Man erkennt daraus die Wichtigkeit einer Kompensation der Felder durch gebündelte Anordnung von Hin- und Rückleiter. Da die Dipolmagnete B1 den gleichen Strom führen wie die Magnete B2 kann die in Abb. 8.8 dargestellte Anordnung gewählt werden, was zu einer beträchtlichen Einsparung an Cu-Leitung führt. Die gleiche Anordnung kann bei der Stromzuführung zu den Quadrupolen (paarweise) gewählt werden.

Tab. 8.2 Querschnitt und Menge der Verbindungsleitung

		Magnetkreis	Strom	Querschnitt	Menge
B1	8	Dipol-Magnete	1293A	6 * 185mm <sup>2</sup>	1500m
B2	12	Dipol-Magnete	1293A	6 * 185mm <sup>2</sup>	1500m
Q1	8	Quadrupole	154A	1 * 185mm <sup>2</sup>	250m
Q2	8	Quadrupole	261A	1 * 185mm <sup>2</sup>	250m
Q3	8	Quadrupole	200A	1 * 185mm <sup>2</sup>	250m
Q4	8	Quadrupole	246A	1 * 185mm <sup>2</sup>	250m
Q4	8	Quadrupole	261A	1 * 185mm <sup>2</sup>	250m
Q6	16	Quadrupole	261A	1 * 185mm <sup>2</sup>	250m
SV	8+16	Sextupole	200A	1 * 185mm <sup>2</sup>	250m
SH	24	Sextupole	200A	1 * 185mm <sup>2</sup>	250m

= 5000m

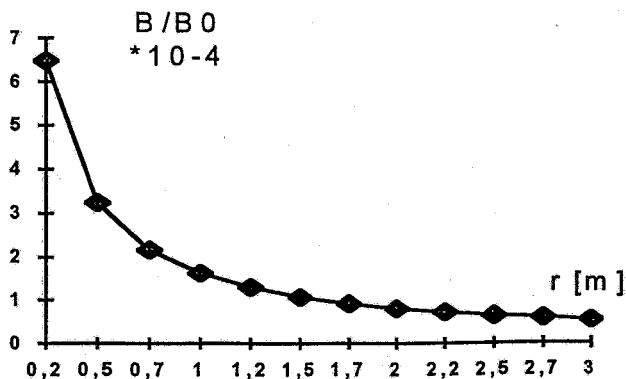


Abb. 8.7:  $B/B_0 \cdot 10^{-4} = f(r)$  ( $B_0 = 1,5T$ )

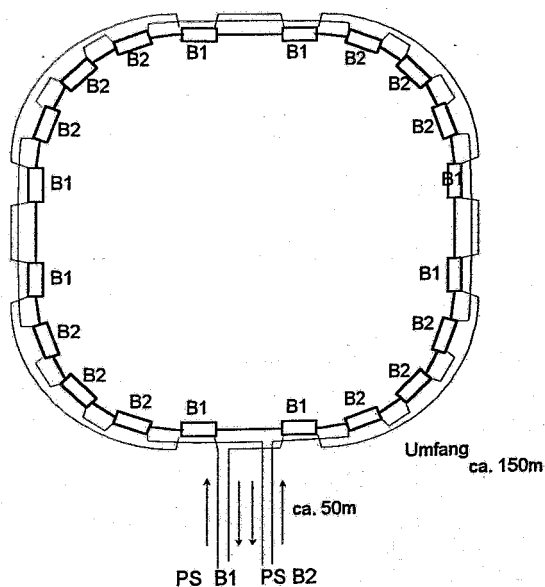


Abb. 8.8: Leitungsführung B1 u. B2

### 8.3 Spannungsversorgung für HF-System

Zum Betrieb des Klystrons wird eine Gleichspannung von ca. 75 kV bei einem Strom von ca. 10 A benötigt. Diese muß in Grenzen von 30...75 kV einstellbar sein und auf den eingestellten Wert konstant gehalten werden. Außerdem muß sie bei einem Überschlag im Klystron innerhalb weniger Mikrosekunden auf einen unschädlichen Wert herabgesetzt werden können. Um das zu erreichen ist es notwendig, erstens die Energiezufuhr aus dem Netz sofort abzuschalten und zweitens die in den Siebglied gespeicherte Energie

schnell abzuführen. Um dies zu realisieren bietet sich eine Stromrichter-schaltung mit Zwischenkreis, wie in Abb. 8.9 dargestellt, an. Dieses Schaltungsprinzip wurde mit Erfolg bei allen Hochspannungsanlagen am DESY angewendet. Damit die Vorschriften nach VDE 100 ( Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen unter 1000 V) zur Anwendung kommen, sollte die Zwischenkreisspannung unter 1 kV liegen. Die Verstellung und Schnellabschaltung bei Havarie erfolgt durch antiparallele Thyristoren im Zwischenkreis. Die dort entstehende Phasenanschnitts-Wechselspannung wird dem Hochspannungstransformator zugeführt und auf der Hochspannungsseite mit ungesteuerten Dioden gleichgerichtet. Damit die verbleibende Restwelligkeit der Hochspannung bei sparsamsten Einsatz von Siebmitteln (geringe Energiespeicherung) klein bleibt, wird eine 12-Puls Schaltung verwendet.

Die vom Zeitpunkt des Eintretens eines Überschlages am Klystron bis zum Abschalten der Energiezufuhr vergehenden Zeit (Sperrzeit der Thyristoren) beträgt im ungünstigsten Fall 3,8 ms. Während dieser Zeit wird noch Energie in den sekundären Kurzschluß eingespeist. Als begrenzendes Element wirkt hier nur noch die Induktivität der Glättungsdrossel auf der Hochspannungsseite. Sie verhindert, daß der Strom während der 3,8 ms auf unzulässig hohe Werte ansteigt. Die in den Siebgliedern gespeicherte Energie muß möglichst schnell abgebaut werden. Dafür wird eine Schutzschaltung vorgesehen, die beim schnellen Ansteigen des Nennstromes die Thyristoren sperrt und über einen Impulstransformator eine Schutzfunkenstrecke innerhalb weniger Mikrosekunden zündet. Die gespeicherte Energie wird dann im Lichtbogen und einem Vorwiderstand abgebaut [De 92].

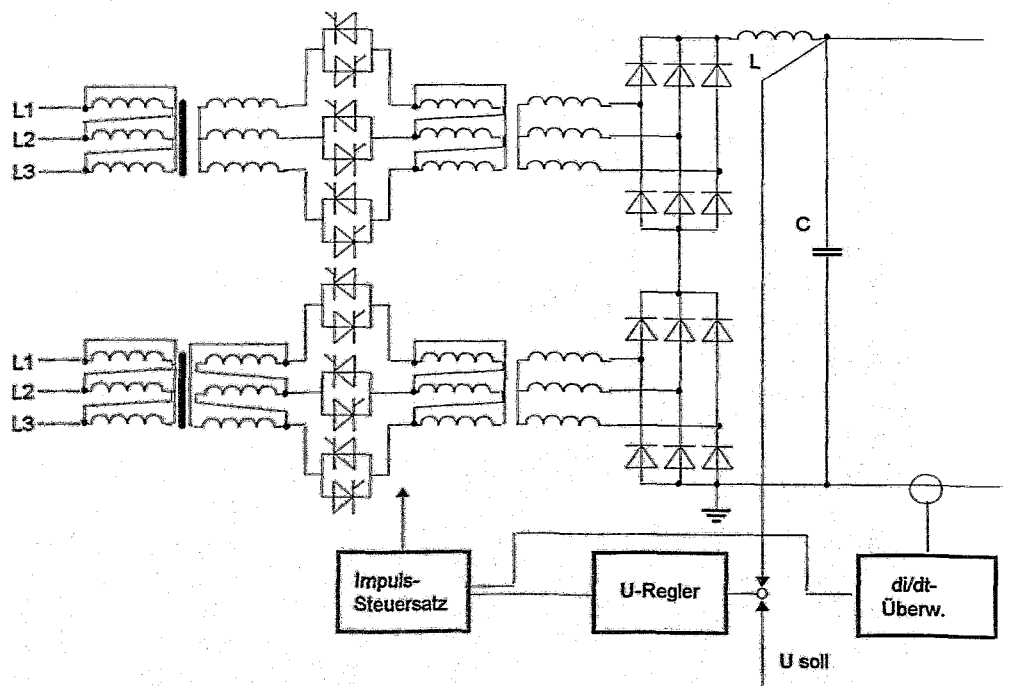


Abb. 8.9: Prinzip Betriebsspannungsversorgung für HF-System

Die Stromversorgungen für die HF-Systeme müssen aus industriellen Anlageteilen entsprechend der geforderten Werte zusammen gestellt werden. Dabei sollten die Erfahrungen der anderen Einrichtungen (z.B. DESY) genutzt werden.

#### 8.4 Anschluß an das Kontroll- und Überwachungssystem

Das Kontrollsystem übermittelt über eine serielle Datenübertragung den adressierten Steuereinheiten der Power Supplies die Sollwerte der einzelnen Ströme sowie Befehle und erhält Angaben über den aktuellen Istwert sowie den Status der Anlage. Bedingt durch die serielle Übertragung der einzelnen Informationen treten zeitliche Verzögerungen auf, die z.B. beim Start des Rampens unzulässige Verschiebungen verursachen können. Um das zu vermeiden müssen alle Power-Suplies mit einem gemeinsamen Signal gestartet werden. In der Steuereinheit, die entweder im Power Supply integriert oder in unmittelbarer Nähe angebracht werden sollte, werden mit einer intelligenten Einheit die ankommenden Signale aufbereitet (Potentialtrennung, Serien-Parallel-Wandlung 16 Bit-DA-Wandlung ) und dem Regler zur Verfügung gestellt. Das gleiche geschieht in umgekehrter Richtung. Der vom DCCT-Wandler bereitgestellte Analogwert (Strom-Istwert) wird über einen 16Bit-AD-Wandler zusammen mit den, in digitaler Form vorliegenden Statussignalen, potentialgetrennt, seriell zum Kontrollsystem übertragen. Das Prinzip ist in Abb. 8.10 dargestellt. Die Güte des Stromes hängt maßgeblich von der Güte des bereitgestellten Sollwertes ab. Dieser wiederum ist abhängig von der Genauigkeit und Linearität des verwendeten DA-Wandlers.

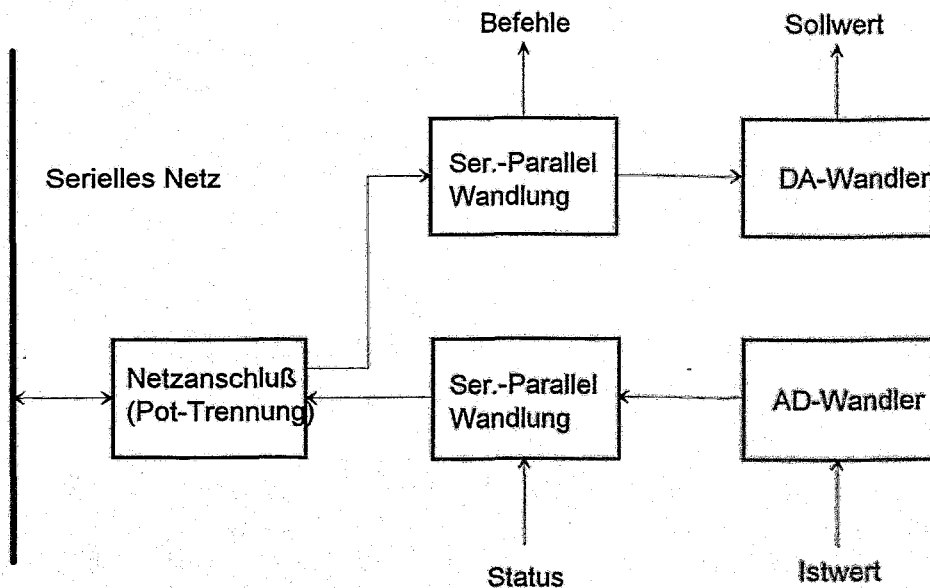


Abb. 8.10: Prinzip - Anschluß an das Kontrollsystem

Folgende Mindestforderungen an den DA-Wandler sollten erfüllt werden.

- Auflösung  $\geq 16$  Bit (= 0,0008%)
- integrale und differentielle Nichtlinearität  $< 0,5$  LSB
- Temperaturkoeffizient  $\leq 10^{-6}/K$
- Gute Langzeitstabilität
- Deglitscher

Um den Kontrollsystem den exakten Istwert zu übermitteln, sollte auch der AD-Wandler die gleichen Gütewerte aufweisen.

Unabhängig von dem Statussignalen, die dem Kontrollsystem eine Übersicht über den aktuellen Zustand der Anlage und Aussagen über eventuell vorhandene Störungen vermitteln, muß ein schnelles Schutz- und Überwachungssystem in unmittelbarer Nähe des Power Supplies vorhanden sein. Dieses sollte folgende Werte überwachen und beim Überschreiten vorgegebener Grenzwerte eine Störungsmeldung generieren bzw. die Anlage in einen sicheren Zustand bringen oder abschalten.

- Überwachung der Netzspannung
- Ausfall einer Phase des speisenden Netzes
- Schutz gegen Kurzschluß primär und sekundär vom Transformator
- Schutz der einzelnen Thyristoren bzw. Dioden (Fehler am Gleichrichter bzw. im Filterkreis)
- Überwachung der Restwelligkeit des Gleichspannungskreises
- Überwachung des vorgegebenen Stromgrenzwertes
- Temperaturüberwachung aller Leistungsbauteile (Überlastung, Ausfall der Kühlung,)
- Erdschluß des Gleichspannungskreises
- Überwachung des Kühlwassers

Alle Überwachungsschaltungen sind so auszulegen, daß bei Ausfall einer Betriebsspannung, einen Leitungsbruch usw. die Anlage in einen sicheren Zustand übergeht (fail safe).

## 8.5 Energieversorgung der gesamten Anlage ROSY

### 8.5.1 Allgemeine Betrachtungen

Zum Betrieb der Anlage ROSY werden größere Energiemengen benötigt, die aus dem Landesnetz bereitgestellt werden müssen. Die gegenwärtige Verteilungsspannung beträgt 20 kV. Sollte mit den gewünschten Werten die Leistungsgrenze überschritten werden, dann muß ein direkter Anschluß an das 110 kV Netz vorgesehen werden.

Die zugeführte Energie wird letztendlich in Wärme umgewandelt, die über einen Wasserzwischenkreis oder direkt an die Atmosphäre abgegeben wird.



Um die örtlichen Temperaturen in den geforderten Grenzen zu halten, ist für eine gute Wärmeabführung zu sorgen. Zur Einsparung von Energie ist auf gute Wirkungsgrade aller Anlagenteile zu achten.

### 8.5.2 Energiebedarf

Der notwendige Energiebedarf der gesamten Anlage teilt sich in folgende Hauptkomponenten auf:

- Gleichstromversorgungsanlagen für die Magnete
- Gleichspannungsanlage als Betriebsspannung für das HF-System am Speicherring
- Betriebsspannung für das Booster-Synchrotron
- Versorgung der Kühlwasserpumpen
- Versorgung der Vakuumpumpen
- Versorgung von Regeleinrichtungen, sowie des Kontroll- und Leitsystems
- Versorgung der Nutzer (Experimente)
- Allgemeiner Bedarf (Haustechnik, Beleuchtung, Klimaanlage usw.)

Aus dieser Aufstellung ergibt sich folgender Energiebedarf.

Versorgung der Ablenkmagnete, Quadrupole und Sextupole am Speicherring (3,0 GeV) mit den notwendigen Gleichströmen :

B1	8	Dipol-Magnete	184 V	1293 A	238 kW
B2	12	Dipol-Magnete	353 V	1293 A	456 kW
Q1	8	Quadrupole	49 V	154 A	8 kW
Q2	8	Quadrupole	111 V	261 A	29 kW
Q3	8	Quadrupole	51 V	200 A	10 kW
Q4	8	Quadrupole	62 V	246 A	15 kW
Q4	8	Quadrupole	83 V	261 A	22 kW
Q6	16	Quadrupole	132 V	261 A	35 kW
SV	8+16	Sextupole	144 V	200 A	29 kW
SH	24	Sextupole	144 V	200 A	29 kW

-----  
 ≈870 kW

Versorgung HF-System für den Speicherring :

75 kV

600 kW

Versorgung Booster-Synchrotron

500 kW

Sonstige Stromversorgungseinrichtungen

110 kW

2080 kW

Bei einem mittleren Wirkungsgrad von 80%

(Stromversorgungseinrichtung + Zuleitungen)

ergibt sich eine Gesamtleistung der Stromversorgungen von

≈2600 kW

Der Betrieb der Pumpen benötigt:

Kühlwasserpumpen	120 kW
Vakuumpumpen	180 kW

Für die weiteren Anlagenteile kann man schätzungsweise folgende Werte annehmen:

Nutzer (Experimente)	300 kW
Regelung/Steuerung	20 kW
Kontroll- und Leitsystem	100 kW
Haustechnik / Beleuchtung / Klimaanlage	280 kW
	-----
	1000 kW

damit ergibt sich eine Gesamtleistung von

≈ 3600 kW

In Abb. 8.11 und 8.12 sind diese Daten graphisch dargestellt.

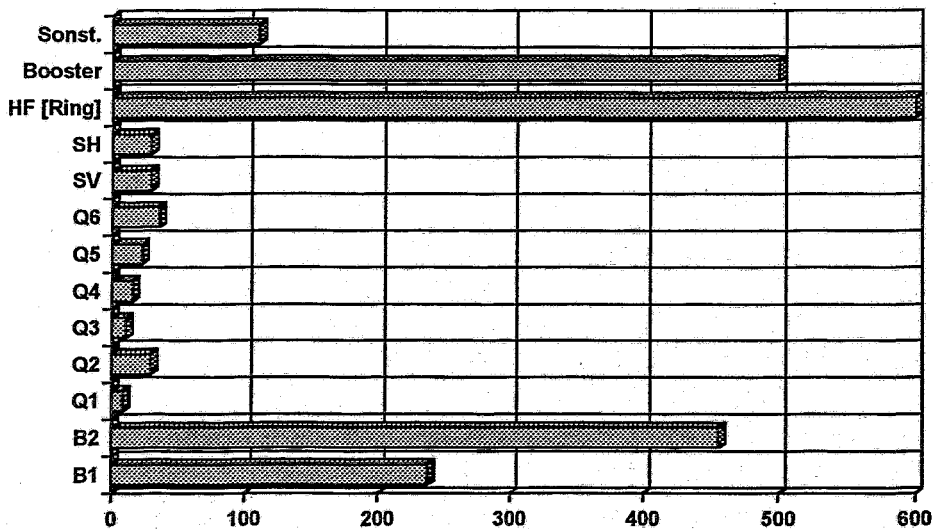


Abb. 8.5.1 : Energiebedarf Stromversorgungseinrichtungen

In Abb. 8.13 ist die Energieversorgung in einer Übersicht dargestellt. Ausgehend von dem zur Zeit vorhandenen Mittelspannungsnetz 20 bzw. 30 kV wird eine 10 kV Unterverteilung vorgesehen. Diese speist über die Transformatoren T2, T11, T12 drei getrennte Unterverteilungen 0,4 kV. Die Trennung ist notwendig, um Störungen, z.B. Anlauf einer Pumpe, nicht unmittelbar der Regeleinrichtung zuzuführen bzw. die Blindleistungskompensation an dem Ort ihrer Entstehung auszuführen zu können. Die

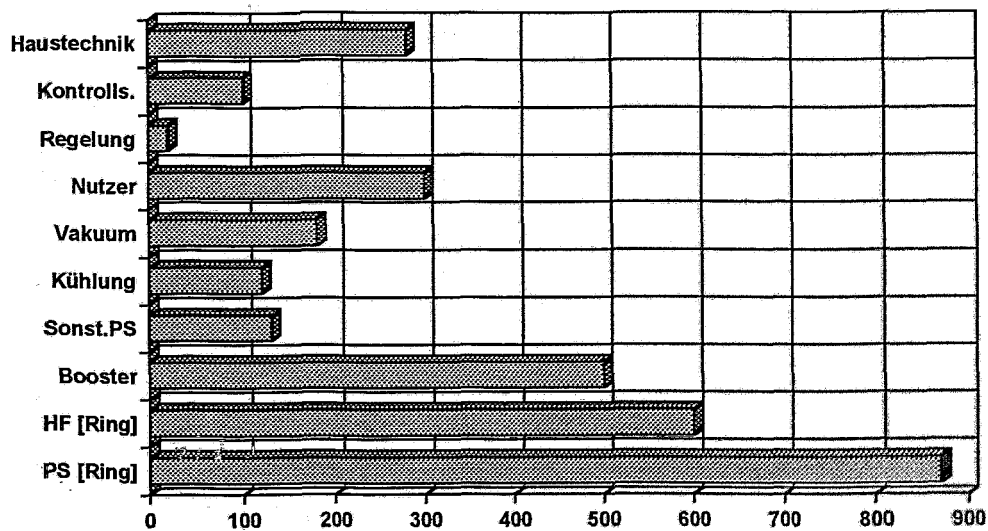


Abb. 8.12 : Energiebedarf gesamt

Transformatoren für die Versorgung des HF-Generators werden unmittelbar von den 10 kV gespeist, damit die Ströme in vertretbaren Grenzen bleiben. Da der Energiebedarf von 4,4 MW den gegenwärtigen Bedarf des Forschungszentrum entspricht muß zur gegebenen Zeit geprüft werden, ob ein unmittelbarer Anschluß des FZR an eine höhere Spannung (110 kV) sinnvoller ist. Diese Entscheidung muß vom Energieversorgungsunternehmen getroffen werden.

Die Verteilungstransformatoren sind in einer Freiluftanlage in unmittelbarer Nähe des Gebäudes aufzustellen. Die 10 kV- sowie 0,4 kV-Schaltanlagen befinden sich in einen Anbau am Speicherringgebäude (siehe Grundriß). Die Verlegung der Kabel erfolgt in Kabelkanälen.

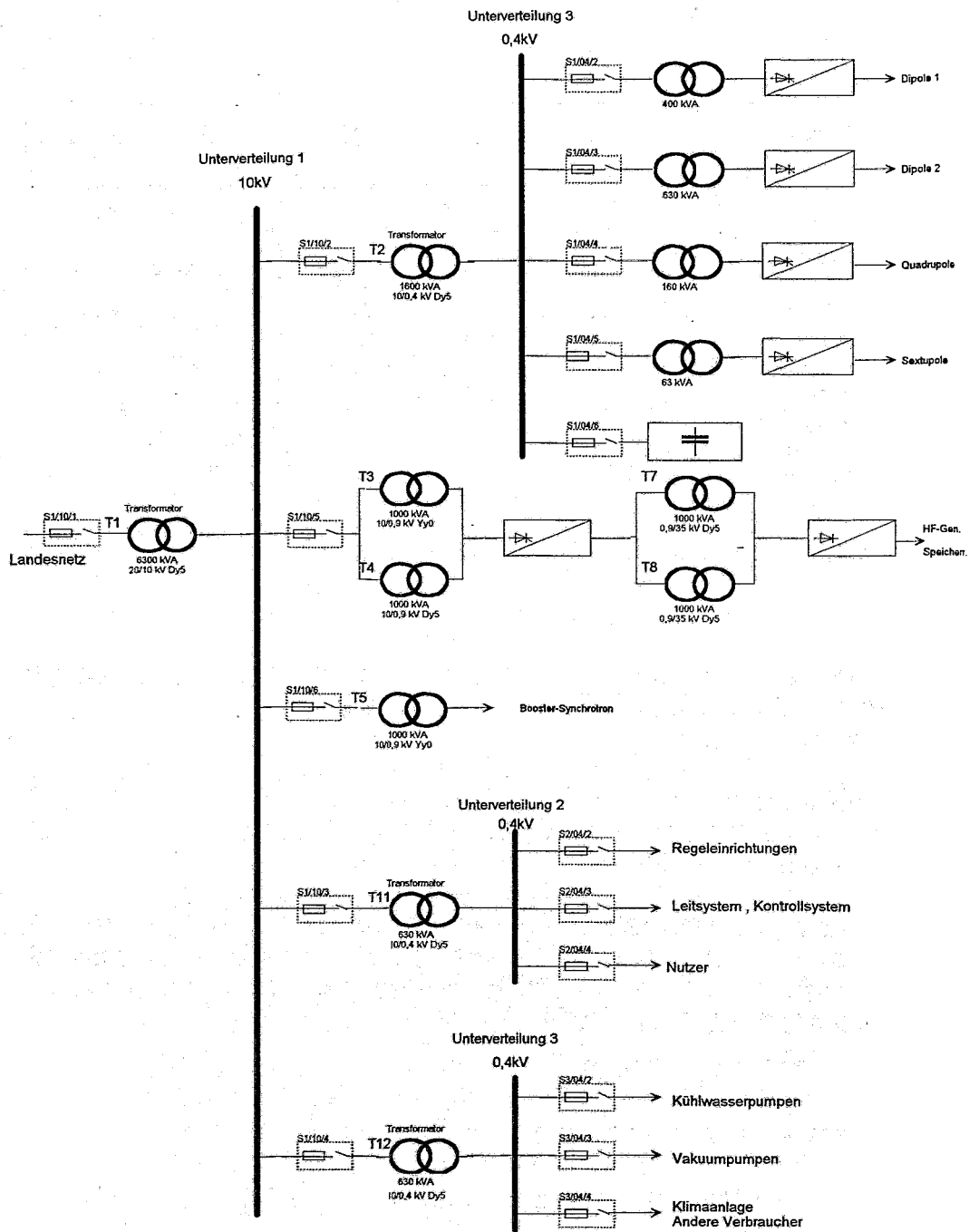


Abb. 8.13: Energieversorgung (Übersicht)

## 8.6 Abführung der Verlustleistung

Für die Versorgung aller Magnete und der HF-Systeme ist eine Gesamtleistung von ca. 2,6 MW erforderlich. Da nahezu die gesamte Energie (ca. 85%) durch Wasserkühlung abzuführen ist, wird bei einer zugelassenen mittleren Temperaturerhöhung des Kühlwassers von ca. 10 K eine Wassermenge von

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{2,6 \text{ MJ} \cdot \text{s}^{-1}}{4,17 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 10 \text{ K}} \quad c = 4,17 \text{ m}^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ MJ} \quad J = 1 \text{ Ws}$$

$$m = 63 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 3750 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

mit einer Eintrittstemperatur < 30°C benötigt.

Es wird ein geschlossener Kreislauf mit entionisiertem Wasser vorgesehen, der über einen Wärmetauscher mit normalem Brauchwasser gekühlt wird. Zur Rückkühlung des Wassers im zweiten Kreislauf ist ein Trockenkühlturm vorgesehen. Um die Kühlwassermenge zu reduzieren und die Rückkühlung zu verbessern, besteht die Möglichkeit, die Temperaturdifferenz des Wasser bei den Stromversorgungsgeräten auf 20°C zu erhöhen. Auf Grund der hohen Genauigkeit der Strahlführung sollte die Kühlwassertemperatur für die Magnete weniger als 5 K schwanken. Das setzt eine hohe Kühlwassermenge mit konstanter Eintrittstemperatur voraus. Die Führung des Kühlwassers sollte in V2A- oder Cu-Rohren erfolgen. Wasserschläuche müssen druckfest (Prüfdruck 21 bar) sein und sie müssen so verlegt werden, daß sie keinerlei Strahlung ausgesetzt sind. Bei der Projektierung der Anlage ist darauf zu achten, daß durch die Pumpen verursachte Druckschwankungen keine mechanischen Schwingungen am Magnetsystem erzeugen.

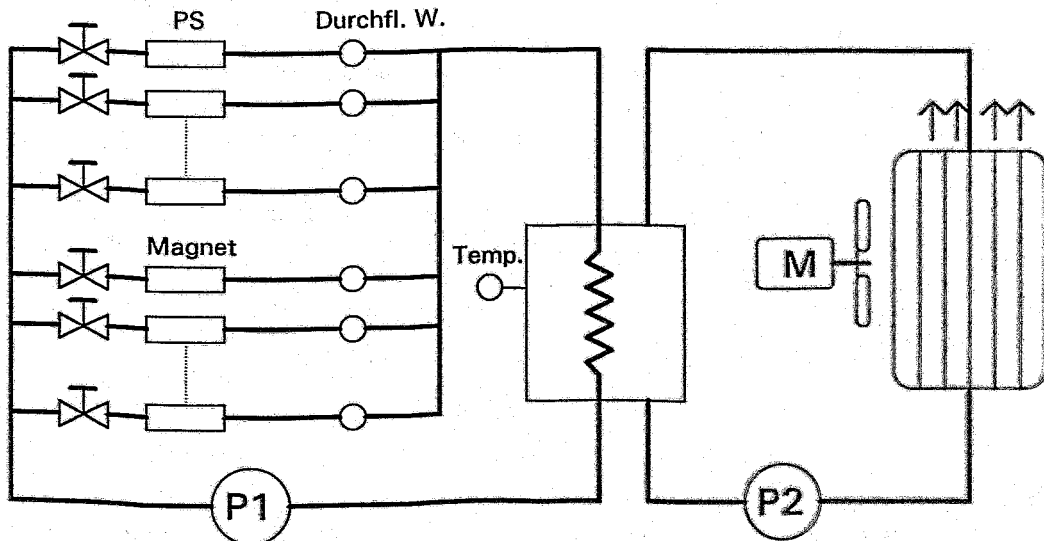


Abb. 8.14: Prinzip Kühlkreislauf

## 9 Vakuumsystem ROSY

### 9.1 Vorbemerkungen

Die Lebensdauer des Elektronenstrahls wird wesentlich durch das Vakuum bestimmt, d. h. durch die Zahl der Zusammenstöße mit den Restgasmolekülen im Speicherring und damit verbunden eine Streuung der Elektronen, die somit ihre stabile Bahn verlassen.

Der notwendige Arbeitsdruck läßt sich überschlägig errechnen aus

$$p = 3 \times 10^{-8} \times t^{-1} \quad [\text{mbar}] \quad (9.1)$$

$t$  ... Strahllebensdauer in h

Für ROSY ergibt sich bei einer angestrebten Strahllebensdauer von 10 Stunden ein notwendiger Arbeitsdruck von  $\leq 3 \times 10^{-9}$  mbar. Der Enddruck des Speicherringes liegt im Bereich von  $10^{-10}$  mbar. Dies entspricht allgemein den Daten der Synchrotronstrahlungsquellen.

Um den Arbeitsdruck zu erzeugen und während des Prozesses auch aufrecht zu halten, sind über den gesamten Ringumfang Pumpen angeordnet. In den Dipolen und in Bereichen erhöhter thermischer Desorption muß die installierte Saugleistung besonders groß sein.

Der im Speicherring anfallende Gasstrom hat zwei wesentliche Ursachen:

- Thermische Desorption von Gasmolekülen von den Innenflächen des Ringes
- Desorption von Restgasmolekülen durch Synchrotronstrahlung.

Die thermische Desorption ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Wesentlich sind die Größe der Oberflächen (Innenoberflächen der Vakuumkammern und aller Einbauten), die Entgasungszeit und -temperatur.

Nach [Wu 88] können zur Orientierung für sehr saubere Metalloberflächen einige thermische Desorptionsraten in Abhängigkeit der Pumpzeit aus Tab. 9.1 angenommen werden. Mit diesen Werten wurden für ROSY die Desorptionsströme errechnet, bezogen auf eine überschlägig ermittelte Oberfläche von ca.  $70 \text{ m}^2$  (siehe Tab. 9.1).

Tab. 9.1: Desorptionsraten und -strom

Pumpzeit [h]	Desorptionsrate [mbar l/s cm <sup>-2</sup> ]	Desorptionsstrom $Q_{th}$ für ROSY [mbar l/s]
1	10 <sup>-9</sup>	ca. 7 x 10 <sup>-4</sup>
10	10 <sup>-10</sup>	ca. 7 x 10 <sup>-5</sup>
100	10 <sup>-11</sup>	ca. 7 x 10 <sup>-6</sup>
1000	10 <sup>-12</sup>	ca. 7 x 10 <sup>-7</sup>

Die Desorption durch Synchrotronstrahlung ("Photonendesorption") entsteht beim Auftreffen der Photonen auf den Wandoberflächen. Dabei werden Photoelektronen gebildet, die die Gasmoleküle von der Wand lösen. Da die Synchrotronstrahlung in den Ablenkmagneten entsteht, tritt vor allem in den Dipolkammern die Photonendesorption auf.

Der Gasstrom  $Q_{sy}$  aus der Desorption durch die Synchrotronstrahlung kann überschlägig errechnet werden [Be 91], [Es 87]:

$$Q_{sy} = 2,7 \times n \times M_{sy} \times K \quad [\text{mbar l/s}] \quad (9.2)$$

$n$  = Zahl der Photonen pro s

$n = 6 \times 10^{20}$  Photonen/s bei 3 GeV und 250 mA

$M_{sy}$  = Desorptionskoeffizient

$M_{sy} = 5 \times 10^{-6} \times D^{-2/3}$  [Es 87]

$D$  = Strahldosis [A h]

$K = 4,1 \times 10^{-20}$  [mbar l/Mol.] [Es 87]

Mit Formel (9.2) wurden einige Richtwerte der "Photonendesorption" errechnet (siehe Tab. 9.2).

Tab. 9.2: Gasstrom  $Q_{sy}$  in Abhängigkeit der Strahldosis

Strahldosis [Ah]	Gasstrom $Q_{sy}$ [mbar l/s]
1	3,3 x 10 <sup>-4</sup>
10	6,6 x 10 <sup>-5</sup>
100	1,5 x 10 <sup>-5</sup>

Die "Photonendesorption" wird mit zunehmender Strahldosis immer kleiner. Dieser Vorgang wird als "Strahlwaschen" bezeichnet. Unter der Strahldosis wird hierbei das Integral aus dem Produkt Strahlstrom und Strahldauer verstanden.

Die Desorption durch Synchrotronstrahlung ist wesentlich größer als die thermische Desorption und beeinflusst signifikant den Arbeitsdruck.

Bei einer geschätzten effektiven Saugleistung von ca. 6700 l/s ergeben sich daraus für ROSY folgende grobe Richtwerte für die Strahllebensdauer in Abhängigkeit der Strahldosis.

Tab. 9.3.: Strahllebensdauer in Abhängigkeit der Strahldosis

Strahldosis [A h]	Arbeitsdruck [mbar]	Strahllebensdauer [h]
1	$5 \times 10^{-8}$	ca. 0,5
10	$1 \times 10^{-8}$	ca. 3
100	$2 \times 10^{-9}$	ca. 10

## 9.2 Vakuumkammern

Bei der Profilauswahl für die Vakuumkammern sind die Abmessungen, der Werkstoff und die Fertigungsmöglichkeiten entscheidende Kriterien. Die Profilabmessungen werden durch die Ringmagnete begrenzt. Bei ROSY wird die Gaphöhe des Dipolmagneten ca. 55 mm betragen. Damit sollte die Profilhöhe bei ca. 50 mm liegen.

Typische Werkstoffe für die Vakuumkammern der Speicherringe sind Edelstahl, Aluminium und Kupfer.

Edelstahl ist für ROSY weniger geeignet, da durch die Synchrotronstrahlung eine hohe Leistung abgegeben wird und diese als Wärme über den Werkstoff abgeführt werden muß. Da die Wärmeleitung des Edelstahls niedrig ist, muß durch zusätzlich eingebaute Kühlkörper die Energie abgeführt werden, was wiederum die Konstruktion komplizierter macht. Beim Speicherring ROSY müssen z.B. 5,6 kW pro Meter Dipolkammerwand weggekühlt werden. Tab. 9.4 enthält einige Vergleichsangaben mit anderen Speicherringen.

Tab. 9.4: Leistungsabgabe in den Dipolkammern durch Synchrotronstrahlung

Speicherring	Strahlstrom [mA]	Elektronen- energie [GeV]	Dipolradius [m]	Leistungsabgabe pro Meter Dipol [kW/m]
DORIS	100	5,5	12,10	8,8
ROSY	250	3,0	7,15	5,6
ESRF	200	6,0	25,00	5,8
DELTA	500	1,5	3,30	3,3



die Gut geeignet für Vakuumkammern sind stranggepreßte Aluminiumprofile, da alle notwendigen Hohlräume gleich mit dem Profil hergestellt werden. Allerdings liegen die Kosten für die Werkzeuge sehr hoch und die Mindestabnahmemenge beträgt 5 t. Da für ROSY nur etwa 0,75 t benötigt werden, scheidet diese Variante aus.

sich Kostengünstig ist die Nachnutzung bereits gefertigter Profile. Und hier bietet er in sich das für HERA (DESY Hamburg) verwendete Profil an (Abb. 9.1), denn

- die Profilhöhe liegt bei 48 mm,
- es kann kommerziell bezogen werden und
- es ist gut wärmeleitend.

Der Werkstoff besteht aus einer CuSn<sub>2</sub>-Legierung. Der Zinnanteil erhöht die Festigkeit, die auch beim Hartlöten erhalten bleibt. Zusätzlich absorbiert Kupfer die Röntgenstrahlung gut, so daß die am Ring verwendeten Werkstoffe und Geräte durch die geringere Strahlungsbelastung eine höhere Lebensdauer haben.

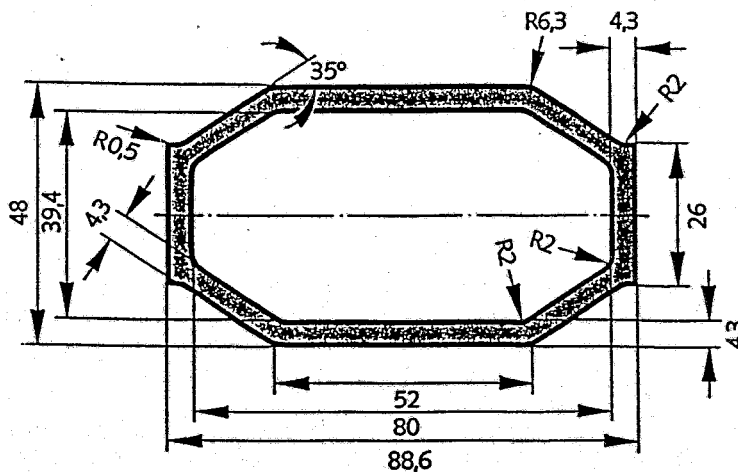


Abb. 9.1: Dipolkammer-Profil

Hersteller: Kabelmetal Osnabrück

g Mit dem Werkstoff Kupfer ist allerdings auch eine komplizierte Löttechnologie verbunden. Sie erfordert sehr viel Fachwissen, einen großen Lötöfen und diverse Vorrichtungen. All das liegt bei DESY Hamburg vor und darauf muß auch zurückgegriffen werden. Der Vorteil des Lötens besteht im verzugsfreien und spaltfreien Fügen.

Unabhängig von dieser Vorzugslösung sollte eine Alternative zum stranggepreßtem Aluminium untersucht werden. Gedacht ist dabei an abgekantetes und geschweißtes Aluminiumblech in Verbindung mit CF-Aluminiumflanschen.

Aus Edelstahl werden die Flachkammern im Bereich der Undulatoren gefertigt.

ROSY besitzt 20 Dipolkammern, die sich sowohl in der Länge als auch in der Anzahl und den Winkeln der Strahlrohrabgänge unterscheiden. In der Abb. 9.2 ist eine Variante skizziert. Einen Überblick über die unterschiedlichen Dipolkammern für ROSY gibt Abb. 9.3. In Abb. 9.5 ist die Anordnung der diversen Dipolkammern im Speicherring dargestellt. Die unterschiedlichen Varianten ergeben sich durch die beiden Dipole  $15^\circ$  und  $20^\circ$  und durch die Winkel, an denen die Synchrotronstrahlung genutzt werden soll. An den Außenseiten der Dipolkammern befinden sich die Abgänge für die Strahlrohre. Einige dieser Abgänge führen durch die Quadrupole und Sextupole durch, weshalb eine flache Form verwendet werden muß. Zur Gewährleistung der Festigkeit muß Edelstahl verwendet werden. Die Synchrotronstrahlung, die nicht durch das Strahlrohr geht, fällt auf die gekühlte Kupferwand. In die Edelstahlabgänge werden wassergekühlte "Nebenabsorber" aus Kupfer eingefügt. Gegenüber der Austrittsöffnung für die Strahlung befindet sich ein Vierkant-Hohlprofil zur Aufnahme einer integrierten Pumpe (Abb. 9.2 und 9.7). Die Pumpspalt zwischen dem Raum des umlaufenden Elektronenstrahls und dem Absorberraum ist aus HF-technischen Gründen verengt. An den Strahlrohranschlüssen werden die Absorber angeflanscht. Diese besitzen an der Profilbreitseite zwei gegenüberliegende Flansche. Der oberliegende Flansch wird durch den Hauptabsorber belegt. Dieser besteht aus einer wassergekühlten Kupferplatte, die bei Bedarf in den Synchrotronstrahl gefahren werden kann. Damit die Leistungsdichte gering bleibt, wird die Platte, die mit kleinen Stufen senkrecht zur Strahlung versehen ist, schräg angeordnet.

An dem zweiten, untenliegenden Flansch wird eine Pumpe angeordnet, die die "photonendesorbierten" Gasmoleküle abpumpt. Alle Anschlüsse sind CF-Flansche aus Edelstahl, die mit Cu-Ringen gedichtet werden. Damit die HF-Verluste an den Flanschverbindungen klein bleiben, schließen "Edelstahlfilze" die vorhandenen Spalte.

Um die thermische Längenausdehnung und auch die Fertigungstoleranzen auszugleichen, befindet sich am Kammereingang ein Ausgleichskörper. Im Inneren dieses Ausgleichskörpers sind Kontaktfedern aus Kupfer-Beryllium so angeordnet, daß die HF-Verluste niedrig bleiben. Ähnliche Ausgleichskörper, die kühlbar sind, werden zwischen die Vakuorkammern gesetzt. Die technische Lösung von DESY könnte übernommen werden. Die geraden Vakuorkammern sind auch aus dem Kupfer-Zinn-Profil gefertigt. Durch reflektierte Synchrotronstrahlung können sie sich erwärmen, weshalb an den Schmalseiten des Profils Kühlrohre angelötet sind.

Im Bereich einiger Quadrupole befinden sich an beiden Profilbreitseiten Hohlräume für integrierte Pumpen (Abb. 9.8). Die Übergänge zwischen dem Speicherringprofil und kreisförmigen Anschlüssen (Septum, Kicker, Cavities) erfolgen allmählich in Form von "Tuten".

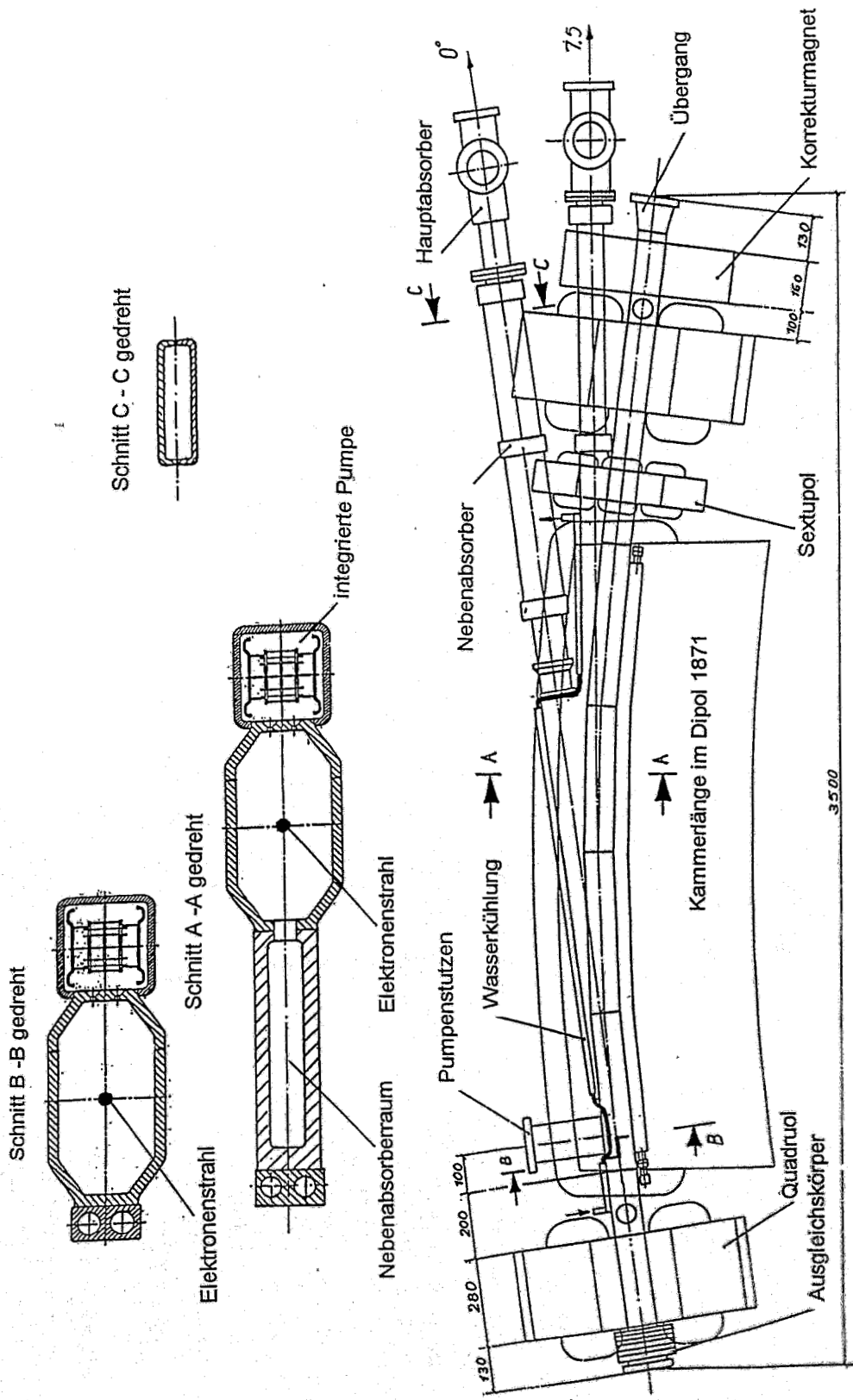


Abb. 9.2: Prinzipskizze einer Dipolkammer

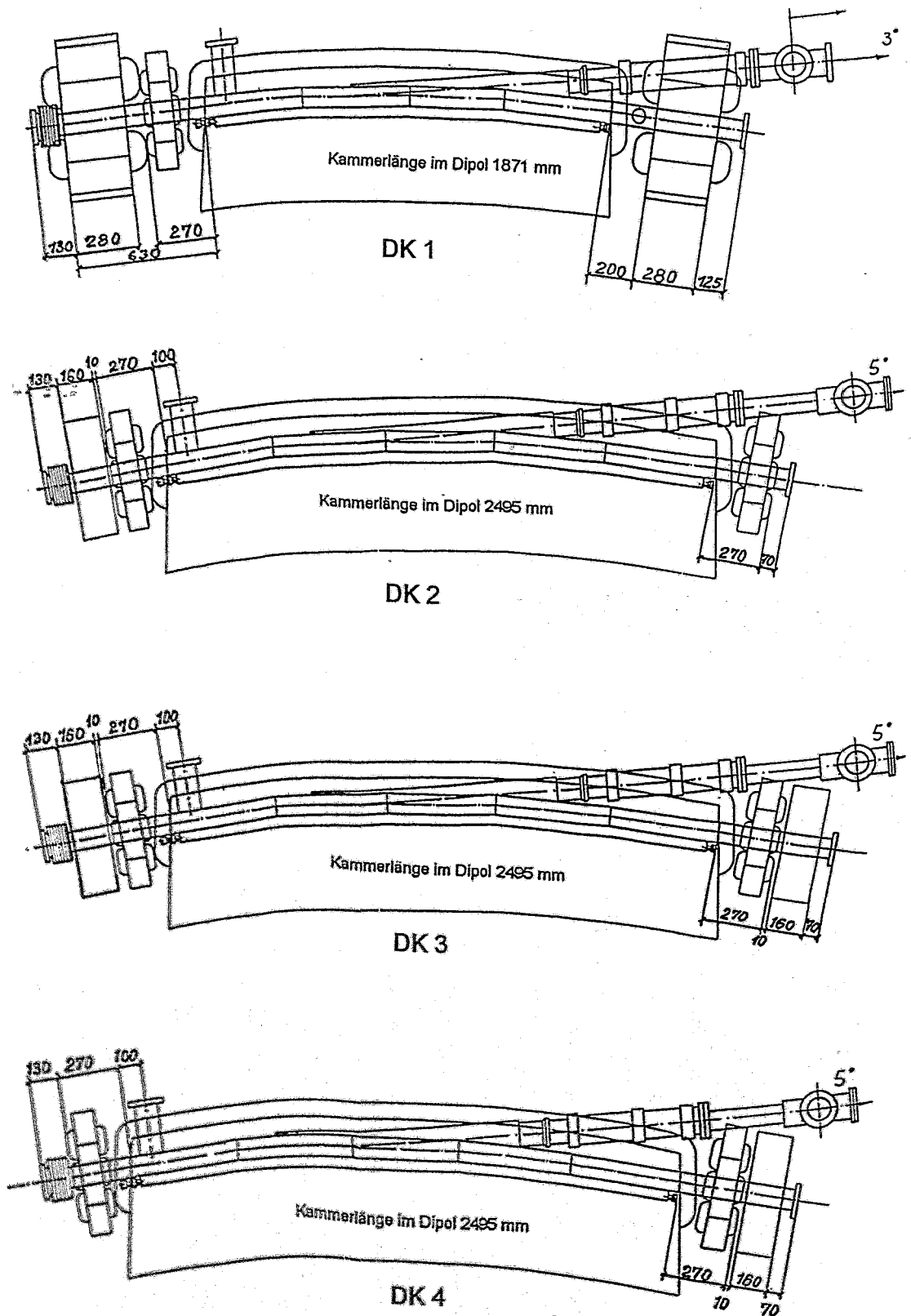


Abb. 9.3: Übersicht der ROSY-Dipolkammern DK (1)

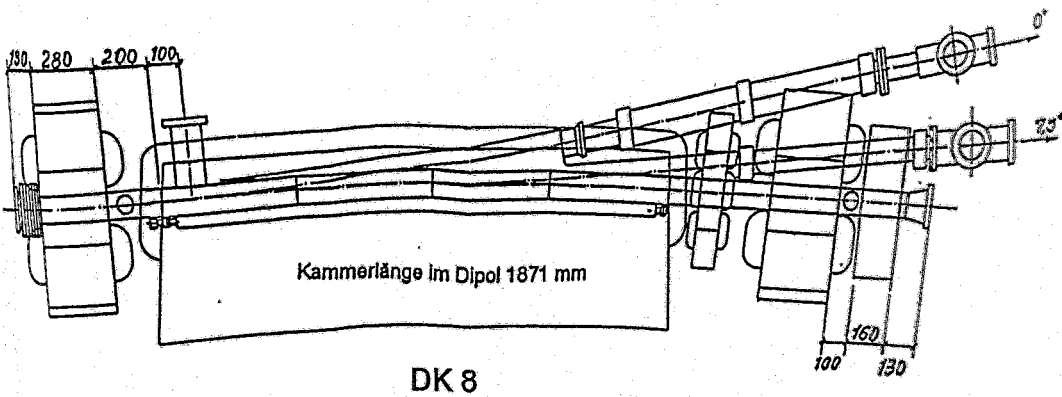
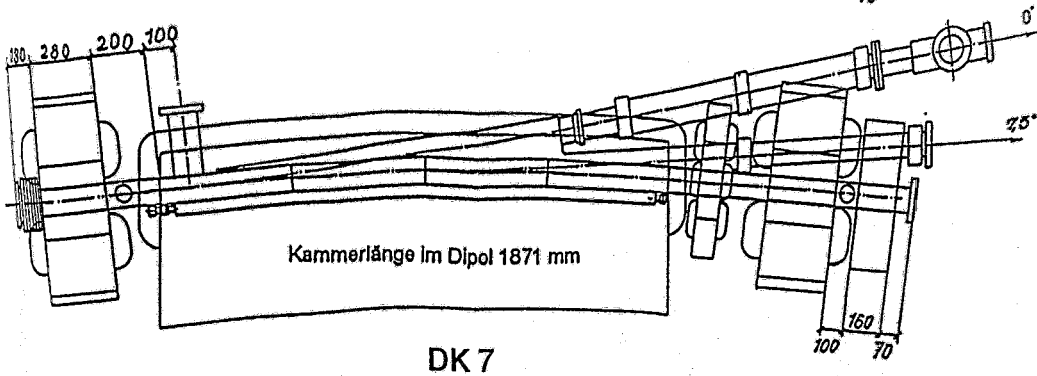
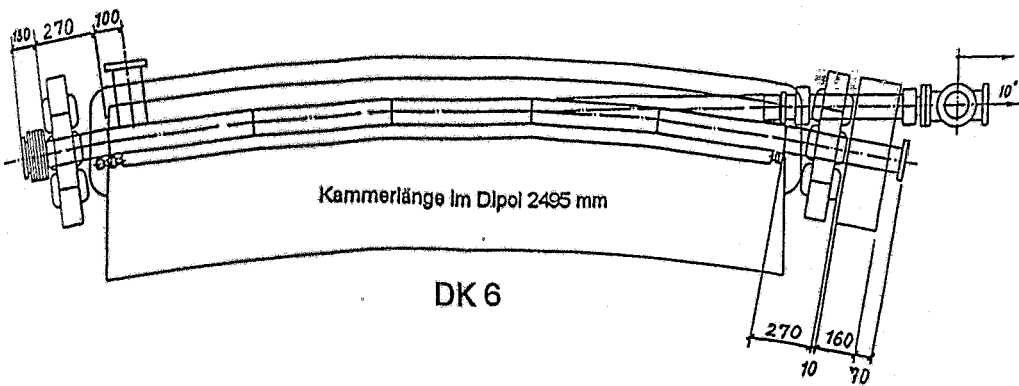
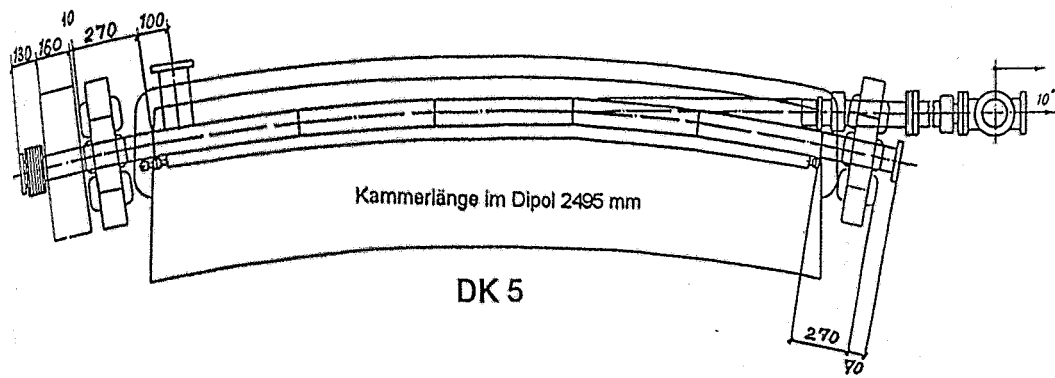


Abb. 9.3: Übersicht der ROSY-Dipolkammern DK (2)

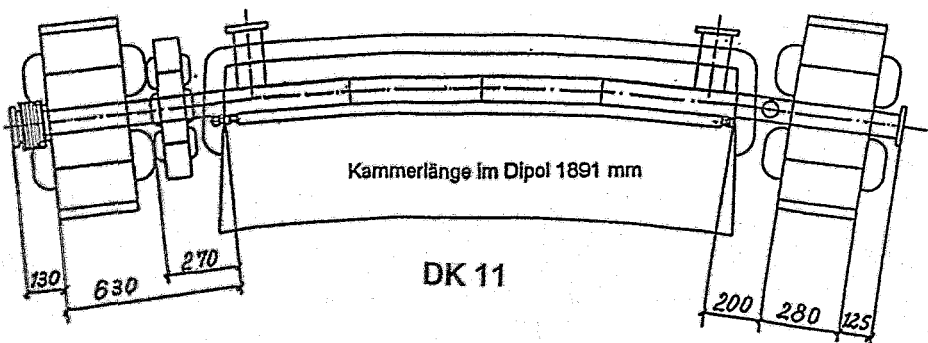
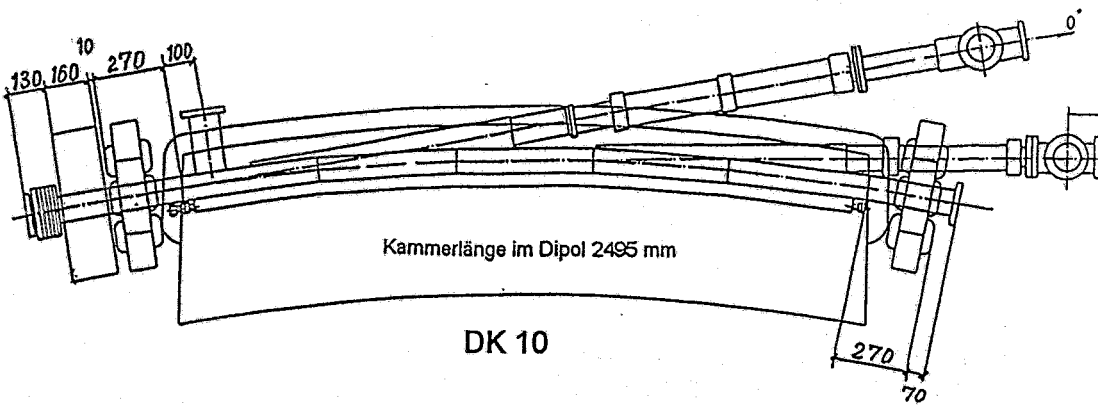
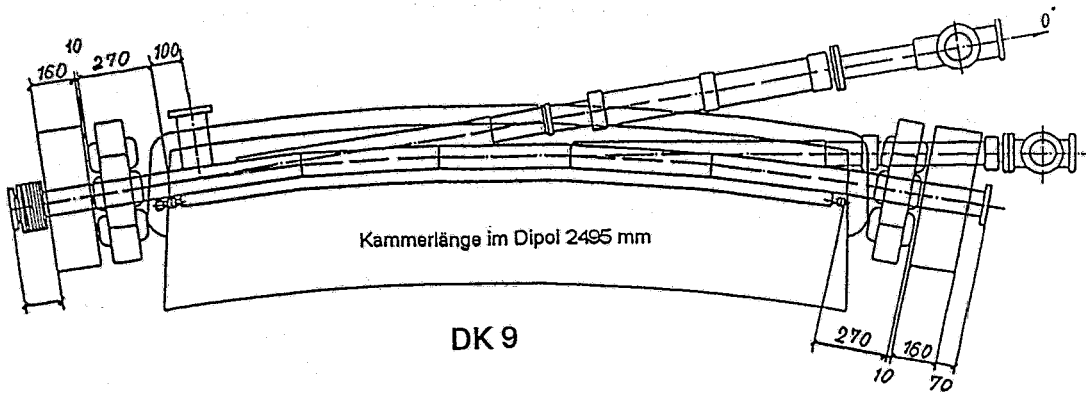


Abb. 9.3.: Übersicht der ROSY-Dipolkammern DK (3)

### 9.3 Vakuumpumpen

Für die Dimensionierung der Vakuumpumpen sind die Leitwerte der Pumpenanschlüsse und des Speicherringprofils von entscheidender Bedeutung. Die effektive Saugleistung errechnet sich wie folgt:

$$S_{eff} = \frac{S_N}{1 + \frac{S_N}{L}} \quad [l/s] \quad (9.3)$$

$S_N$  .... Nenn-Saugleistung [ l/s ]

$L$  .... Leitwert [ l/s ]

In der Abb. 9.4 ist der Leitwertverlauf des Profils dargestellt. Außerdem sind als Beispiel die Verläufe des effektiven Saugvermögens von zwei Pumpen mit unterschiedlichen Saugleistungen ( $S_N = 60$  bzw.  $120$  l/s) dargestellt. Aus diesem Bild ist ersichtlich, daß sich in einer bestimmten Entfernung vom Pumpenanschluß die effektiven Saugleistungen dem Profileitwert annähern. Bereits die Pumpspalte reduzieren die Nenn-Saugleistung beträchtlich. Deshalb müssen viele kleine Pumpen in kurzen Abständen am Ring angeordnet werden.

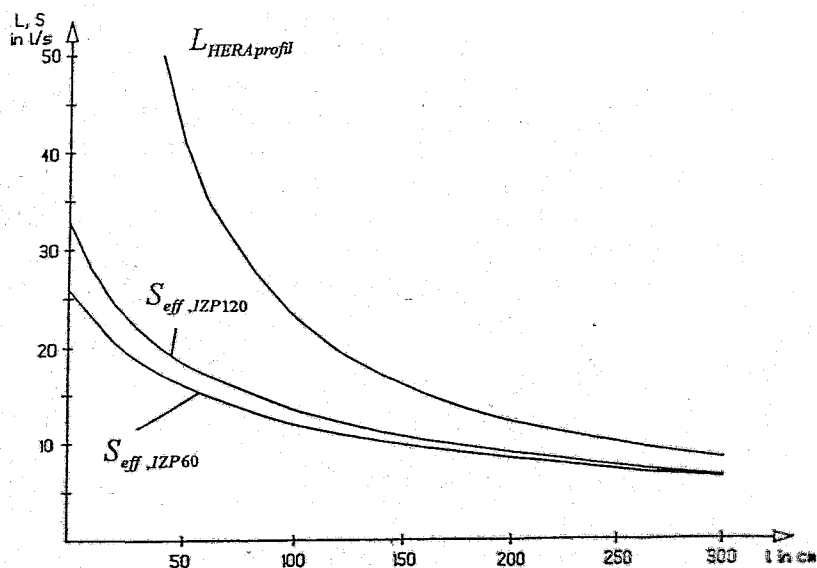


Abb. 9.4: Einfluß des Leitwertes auf die effektive Saugleistung

In der Abb. 9.5 ist der Speicherring dargestellt. Er ist in 8 Vakuumabschnitte eingeteilt. Damit soll erreicht werden, daß bei Montagearbeiten nicht der gesamte Ring belüftet und über lange Zeit wieder konditioniert werden muß, sondern das nach dem Belüften eines Teilabschnittes der Ring kurzfristig wieder betriebsbereit ist. In diesen Fällen können die HV-Pumpstände der benachbarten Abschnitte zusätzlich angeschlossen werden und bringen dadurch einen zeitlichen Gewinn.

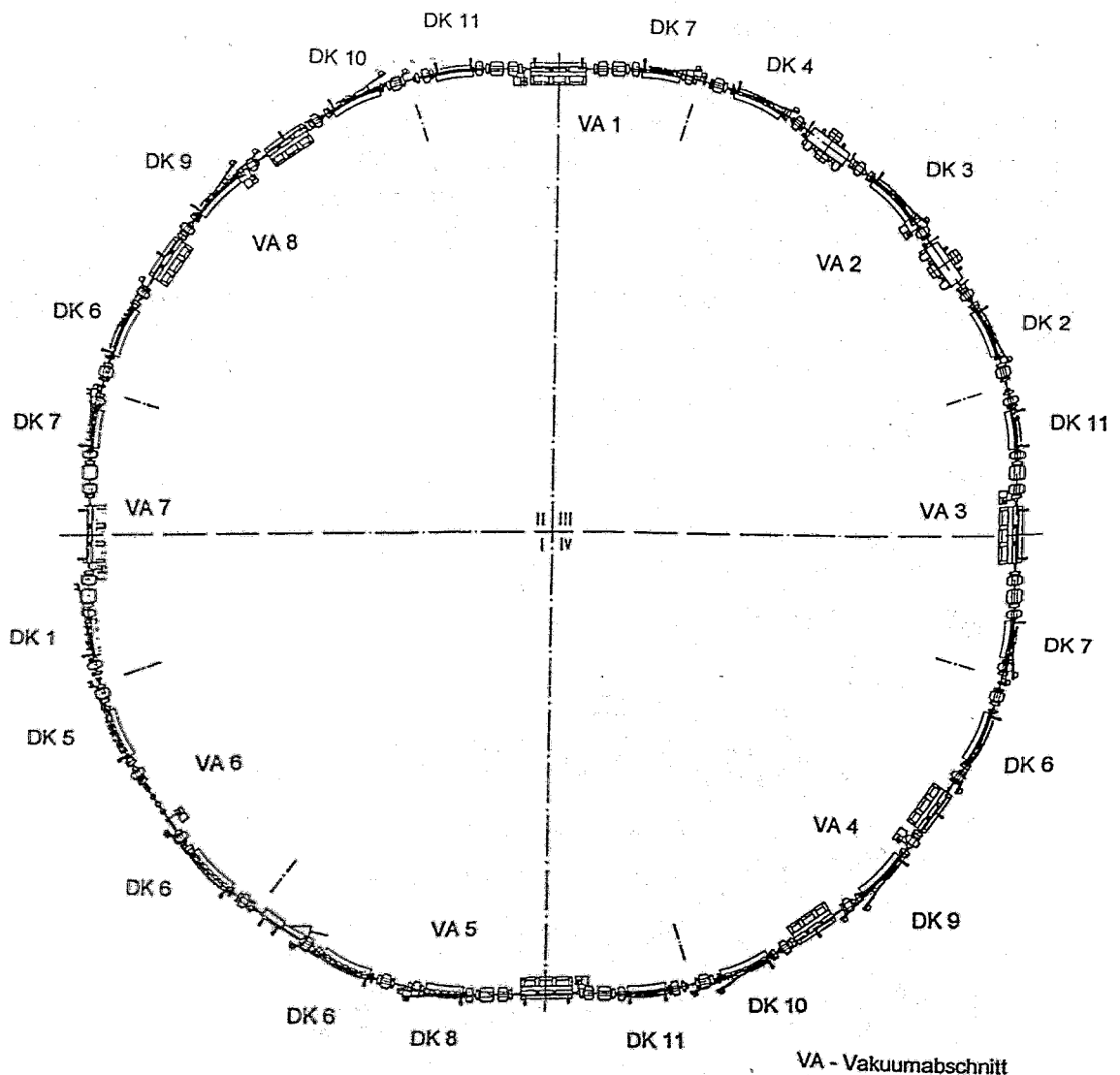


Abb. 9.5: Speicherring - Vakuumabschnitte und Anordnung der Dipolkammern



Abb. 9.6 zeigt das Schema eines Vakuumabschnittes. Das Vakuum wird in Stufen erzeugt. Die 1. Stufe besteht in der Erzeugung des Hochvakuums. Dafür stehen insgesamt 8 komplette HV-Pumpstände zur Verfügung. Sie sind fahrbar und bestehen aus Drehschieber- und Turbomolekularpumpe und dazugehöriger Steuerung. Die Saugleistung der Turbomolekularpumpe ist mit 65 l/s niedrig, aber für den vorhandenen Leitwert ausreichend.

Es wird bis zu einem Druck von ca.  $10^{-6}$  mbar evakuiert. Die UHV-Pumpen können bereits bei schlechteren Drücken arbeiten. Um sie aber nicht unnötig mit Gasmolekülen zu belasten, werden die UHV-Pumpen erst bei  $< 10^{-6}$  mbar zugeschaltet.

An Speicherringen werden zur Erzeugung des UHV vorwiegend

- Ionenzerstäuberpumpen (An- und Einbauvariante)
- NEG-Pumpen und
- Titanverdampferpumpen

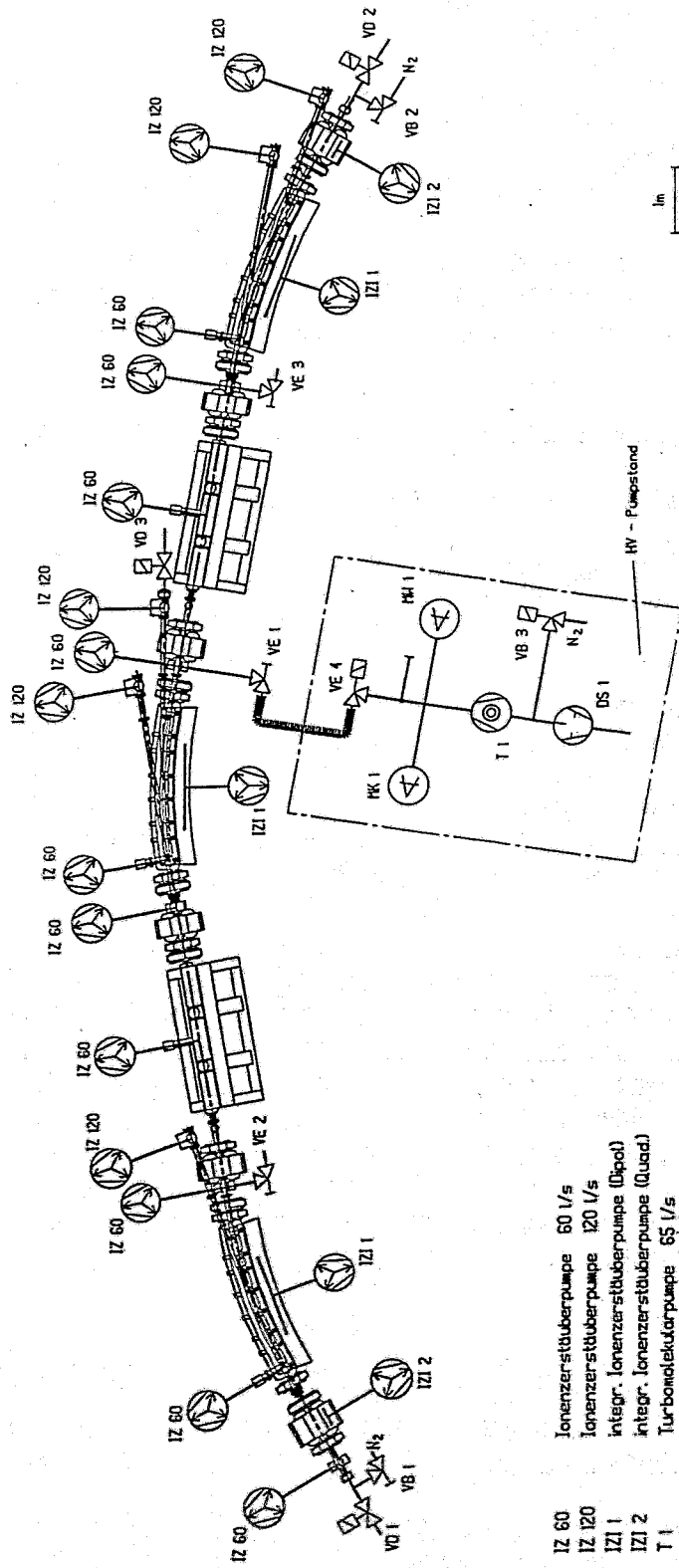
eingesetzt.

Titanverdampferpumpen und NEG-Pumpen sind in der Anschaffung kostengünstig, müssen aber in bestimmten Abständen "betriebsfähig" gemacht werden. Titan muß in kurzen Abständen zur Erzeugung frischer Getterschichten verdampft werden und die NEG-Pumpen müssen in größeren Abständen durch Ausheizen regeneriert werden - das ist ein Nachteil. Titanverdampferpumpen können außerdem keine Edelgase pumpen.

An ROSY ist es vorgesehen, nur Ionenzerstäuberpumpen einzusetzen. Es ist aber möglich, ggf. einen der o.g. Pumpentypen anzubauen. Günstig sind die integrierten Ionenzerstäuberpumpen. Sie lassen sich einfach herstellen, nutzen die vorhandenen Magnetfelder aus und haben bei kurzen Pumpwegen einen hohen Wirkungsgrad. Die erreichten effektiven Saugleistungen liegen bei ca. 30 l/s pro Meter. Diese integrierten Pumpen werden sowohl im Dipol als auch in den längeren Quadrupolen eingesetzt. Hierfür gibt es bei DESY bewährte technische Lösungen. Für ROSY allerdings müssen die Bohrungen in den Anodenblechen den vorhandenen Magnetfeldern angepaßt werden. Die Anordnung der integrierten Pumpen im Dipol ist in Abb. 9.7 und im Quadrupol in Abb. 9.8 dargestellt.

Da die integrierten Pumpen nur arbeiten, wenn die Magnete eingeschaltet sind, wird der Ring noch zusätzlich mit "Haltepumpen" bestückt. Dabei handelt es sich um Ionenzerstäuberpumpen mit einer Nenn-Saugleistung von 60 l/s, die aber bereits durch die "Pumpspalte" auf ca. 40 % reduziert wird.

An Orten erhöhten Gasanfalls (Absorber, Septum, Cavities) werden Pumpen mit einer Saugleistung von 120 l/s und 400 l/s eingesetzt. In Tabelle 9.5 sind die für ROSY vorgesehenen Pumpen einschließlich der Saugleistungen zusammengestellt. Die effektiven Werte beziehen sich auf die Anschlußstellen.



- IZ 60 Ionenzerstüßerpumpe 60 l/s
- IZ 120 Ionenzerstüßerpumpe 120 l/s
- IZI 1 integr. Ionenzerstüßerpumpe (Dipol)
- IZI 2 integr. Ionenzerstüßerpumpe (Quad.)
- T 1 Turbomolekularpumpe 65 l/s
- DS Drehschieberpumpe 4,5 m<sup>3</sup>/h
- VD 1-2 "HF - Schottventil" NH 100
- VD 3 Ganzmetall - Durchgangsventil NH 100
- VB 1-2 UHV - Beiluftungsventile NH 16
- VB 3 Beiluftungsventil
- VE 1-3 UHV - Eckventil NH 40
- VE 2 HV - Eckventil NH 40
- MK 1 Kalkkathoden - Ionisationsmeßgerät
- MH 1 Wärmestrommeßgerät

Abb. 9.6 Schema eines Vakuumabschnittes

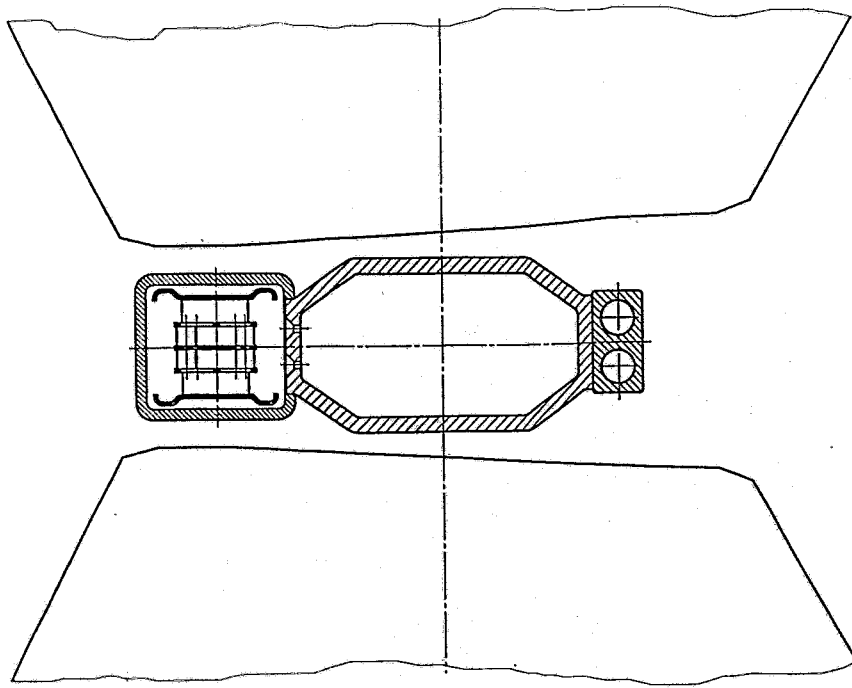


Abb. 9.7: Integrierte Pumpe im Dipol

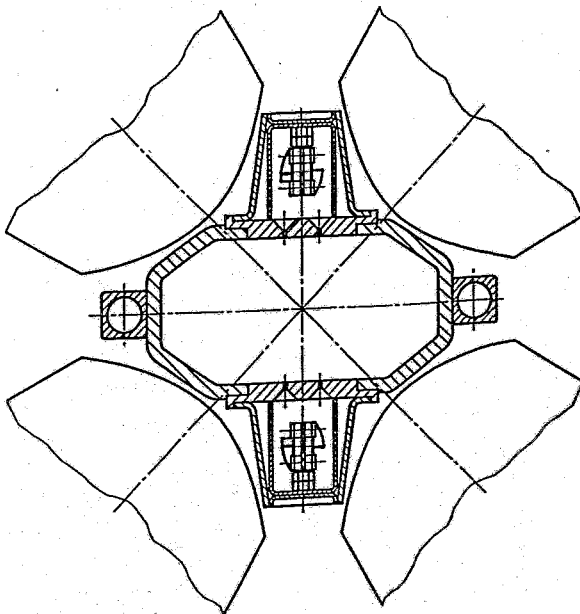


Abb. 9.8: Integrierte Pumpe im Quadrupol

Tab. 9.5: Übersicht der Vakuumpumpen für ROSY

Vakuumpumpe	Stück	$S_N$ [l/s]	$\Sigma S_N$ [l/s]	$\Sigma S_{\text{eff.}}$ [l/s]	Bem.
- HV-Pumpstand	8				
*Drehschieber	8	1,25	10		4,5 m <sup>3</sup> /h
*Turbomolekular.	8	65	520	ca. 50	
- Ionenzerstäuber.	57	60	3420	ca. 1300	
- Ionenzerstäuber.	27	120	3240	ca. 2500 <sup>+</sup> )	Absorber, Septum
- Ionenzerstäuber.	4	400	1600	ca. 400 <sup>+</sup> )	Cavities
- integrierte IZP	20			ca. 1800	Dipol
- Integrierte IZP	24			ca. 700 <sup>+</sup> )	Quadrupol
				$\Sigma \text{UHV-}S_{\text{eff}} = 6700 \text{ l/s}$	

+ ) geschätzte Werte

## 9.4 Belüftungseinrichtungen

Beim Belüften der Vakuumabschnitte sollte möglichst kein Wasserdampf, Kohlenwasserstoffe oder andere schwer abpumpbare Stoffe in den Ring gelangen. Deshalb erfolgt das Belüften mit reinem Stickstoff, gewonnen aus flüssigem Stickstoff, der nochmals über eine Trocknungseinrichtung, z. B. auf Basis von Zeolith, geleitet wird. Zur Verkürzung der Belüftungszeit befinden sich an den Abschnittsventilen ("Schottventile") Eckventile, so daß an beiden Enden gleichzeitig belüftet werden kann.

## 9.5 Ventile

Für den Betrieb des Speicherrings sind diverse Vakuumventile notwendig. Die HV-Pumpstände sind über metallgedichtete, handbetätigte Eckventile angeschlossen.

Die Vakuumabschnitte werden durch "HF-Schottventile" abgetrennt. Diese HF-gerechten Ventile wurden von DESY entwickelt und werden von der Fa. VAT kommerziell angeboten. Sie sind vitongedichtet, haben den oktagonalen Profilquerschnitt von HERA und der Ventilsitz ist wassergekühlt. Der HF-Widerstand ist sehr klein.

Für die Ringbelüftung stehen beidseitig des Schiebers Anschlüsse zur Verfügung. Die Trennung der Strahlrohre von den Dipolkammern erfolgt durch Ganzmetall-Schieberventile. In der ersten Phase werden nicht alle Strahlrohranschlüsse mit Ventilen ausgerüstet, sondern einige davon auch blindgeflanscht.

## 9.6 Vakuum-Diagnostik

Pro Vakuumabschnitt ist für ROSY eine kommerzielle Vakuummeßeinrichtung vorgesehen. Die Meßgeräte zeigen aber nur einen örtlichen Druckwert an. Die Druckdifferenzen im Ring können bis zu ein oder zwei Zehnerpotenzen betragen. Um eine Aussage über den Druckverlauf im Speicherring zu erhalten, wird der Ionenstrom der Zerstäuberpumpen gemessen.

Der Ionenstrom der Zerstäuberpumpen ist proportional der vorhandenen Gasmenge. Er wird für jede Pumpe gemessen und als Betriebsmeßgröße verarbeitet. Hierfür eignen sich die Netzteile von DESY, da sie für diese Strommessung speziell ausgelegt worden sind. Da bei Pumpenausfällen ( $I = 0$  mA) ein zu guter Druck angezeigt wird, erfolgt eine Kontrolle über die angebauten Meßgeräte.

Sollte der Arbeitsdruck nicht erreicht werden, können Lecks eine der möglichen Ursachen sein. Zur Lecksuche gibt es diverse handelsübliche Geräte.

Aussagen über die Restgaszusammensetzung des Vakuums und zur Ermittlung möglicher Verschmutzungen im Ring sind mit einem Massenspektrometer möglich. Es wird nur zur Diagnostik an den Ring angeschlossen. Ansonsten wird das Gerät für die Qualitätskontrolle der Vakuumkomponenten und Baugruppen nach der Fertigstellung bzw. vor der Montage benötigt.

## 9.7 Temperiereinrichtungen

Das Ausheizen von UHV-Apparaturen beschleunigt die thermische Desorption und damit den Evakuierungsablauf. Üblich sind dazu Heizbandagen, die um Rohre und Kammern gewickelt werden und diese auf ca. 250°C aufheizen. Hierzu fehlt allerdings bei Speicherringen, wie z. B. bei ROSY, oft der notwendige Platz. Alternativen wie eingearbeitete Heizdrähte oder Glimmen mit Argon bedeuten einen hohen technischen Aufwand und sind auch durchgängig nicht realisierbar.

Neu ist die Methode der chemischen Zersetzung des angelagerten Wassers nach ISHIMARU [Is 92]. Aber auch hier ist der apparative Aufwand hoch (Temperierung auf ca. 80°C, Gasbatterie, Entsorgung des toxischen Gases) und die Einbindung in den Betriebsablauf ist fragwürdig.

Gute Erfahrungen wurden sowohl bei DESY als auch an anderen Ringen mit folgender Methode gesammelt:

- peinliche "UHV-Hygiene" bei der Komponentenfertigung (saubere und sorgfältige Fertigung, Ausheizen, Qualitätskontrolle usw.), bei der Ringmontage und Beachtung bestimmter Betriebsregime (z.B. kohlenwasserstoff armes Anpumpen),
- wasserdampfarmes Belüften,

- "Strahlwaschen", d.h. durch die Synchrotronstrahlung erfolgt sowohl eine "Photonendesorption" als auch eine verstärkte thermische Desorption und damit eine schnelle Verbesserung des Vakuums.

Die Kühlung ist besonders in den Bereichen der Synchrotronstrahlung wichtig, um thermische Schäden zu verhindern. Außerdem wird durch sie die thermische Desorption während des Betriebes gering gehalten. Als Kühlmedium wird Wasser verwendet.

## 9.8 Ringeinbauten

Als Ringeinbauten werden Cavities, Septum und die Kicker verstanden. Möglich ist die Übernahme vorhandener Geräte. Für das Vakuumsystem sind die Anschlußbedingungen in den Ring und für die Vakuumerzeuger wichtig.

## 9.9 Strahldiagnostik

Vom Vakuumsystem müssen dafür an den Rohren und Dipolkammern die notwendigen Anschlußmöglichkeiten vorgesehen werden.

## 10 Der Injektor

### 10.1 Der Vorinjektor

Die Injektionsenergie für den Speicherring beträgt 800 MeV. Bis zu dieser Energie erfolgt die Beschleunigung in 2 Stufen, mit einem Mikrotron als Vorinjektor bis auf 22 MeV und dem Booster-Synchrotron auf 800 MeV.

Die Einschußenergie für das Booster-Synchrotron muß so hoch gewählt werden, daß beim Einschuß die Dipolfeldstärke der Magnete deutlich über der Remanenzfeldstärke liegt. Nach [BE 89] besteht für die Einschußenergie die Forderung

$$E_{inj} \geq \frac{1}{50} E_{max} \quad (10.1)$$

Für die Abschätzung der Injektionsenergie für das Booster-Synchrotron wird als obere Grenze  $E_{max} = 1 \text{ GeV}$  angesetzt. Damit folgt nach (10.1)

$$E_{inj} \geq \frac{1 \text{ GeV}}{50} = 20 \text{ MeV}.$$

Somit ist ein 22 MeV Mikrotron als Vorinjektor ausreichend. Von SCANDITRONIX wird das 22 MeV Mikrotron M 22 für medizinische Zwecke angeboten, das auch als Vorinjektor verwendet werden kann. Das 800 MeV Booster-Synchrotron von BESSY I [Eg 83] wird mit einem 22 MeV Mikrotron als Vorbeschleuniger betrieben. Die Strahlparameter des zur Zeit von SCANDITRONIX angebotenen M 22 Mikrotrons sind in Tab. 10.1 zusammengefaßt.

Tab. 10.1: Strahlparameter des M 22 Mikrotrons der Firma SCANDITRONIX

Energie [MeV]	14; 17; 22
Peakstrom [mA]	50; 43; 20
mittlerer Strom [ $\mu\text{A}$ ]	45; 40; 17
Energiebreite [keV]	35
Pulslänge [ $\mu\text{s}$ ]	3,5
Emittanz hor. [ $\pi \text{ mm mrad}$ ]	4
vert. [ $\pi \text{ mm mrad}$ ]	13

Die Pulslänge des Vorinjektors muß dem Injektionsprozeß angepaßt sein. Der Einschuß erfolgt während eines Umlaufs (single turn injection) oder zur Erreichung höherer Stromstärke während ca. 3 Umläufe (multi turn injection). Der Umfang des ROSY Boosters beträgt 37,5 m. Da die Elektronen mit nahezu

Lichtgeschwindigkeit umlaufen, beträgt die Umlaufzeit  $\approx 0,2 \mu\text{s}$ . Die Pulslänge des Vorinjektors soll deshalb mindestens  $0,2 \mu\text{s}$  und für längere Injektion etwa  $1 \mu\text{s}$  betragen. Das M 22 Mikrotron ( $3,5 \mu\text{s}$  Pulslänge) genügt dieser Forderung. Die Pulswiederholrate kann mit 10 Hz angesetzt werden. Für diese Frequenz ist bei Verwendung dünnwandiger Vakuumkammern noch keine wesentliche Störung der Magnetfeldqualität am Ort des Elektronenstrahles während des Rampens zu erwarten [BE 89]. Eine perspektivische Darstellung des M 22 Mikrotrons ist in Abb. 10.1 wiedergegeben.

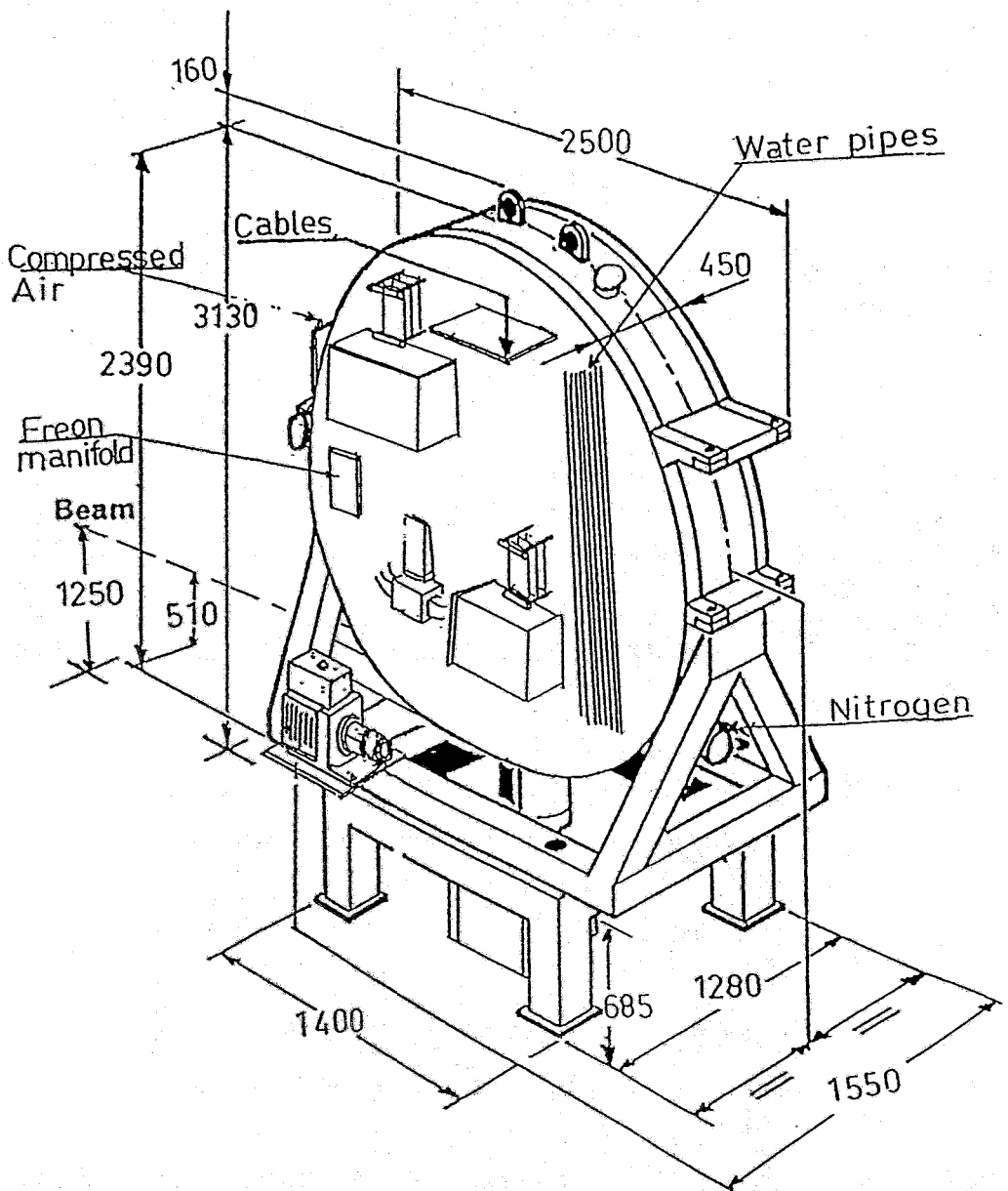


Abb. 10.1: Perspektivische Darstellung des 22 MeV Mikrotrons M 22 der Firma SCANDITRONIX



## 10.2 Das Booster-Synchrotron

### 10.2.1 Übersicht

Die Booster-Synchrotrons für die Synchrotronstrahlungsquellen SRS in Daresbury/Großbritannien [De 75], [Su 78], [Th 80] und NSLS in Brookhaven / New York [Ga 79] haben jeweils FODO-Struktur, wobei bei SRS nur von Combined-Function-Magneten Gebrauch gemacht wird und bei NSLS sowohl Quadrupole als auch Combined-Function-Magnete verwendet werden. Auch in der Design-Studie des Speicherrings für die LIGA-Technik in Mainz [IM 91] wird eine FODO-Struktur mit Combined-Function-Magneten vorgeschlagen.

Ein Booster-Synchrotron soll einfach in der Handhabung sein und zuverlässig arbeiten. Durch die Verwendung der Combined-Function-Magnete wird eine relativ hohe Aufstellgenauigkeit für die Magnete gefordert. Um dies zu umgehen, wurde für ROSY eine Lösung gesucht, bei der die Fokussierung des Elektronenstrahls nur durch Quadrupole durchgeführt wird. Zwei Lösungsansätze wurden untersucht: eine DBA-Struktur und eine FODO-Struktur. Der schematische Aufbau beider Strukturen ist in Abb. 10.2 angegeben. Die elektronenoptischen Parameter sind in Tab. 10.2 aufgelistet. Darstellungen über die berechneten Beta- und Dispersionsfunktionen, Arbeitspunkte im Resonanzdiagramm sowie die transversale Akzeptanz für beide Strukturen enthalten die Abbildungen 10.3 bis 10.5.

Die hier untersuchte FODO-Struktur hat einen Momentum-Compaction-Faktor  $\alpha = 0,182$  ähnlich dem Booster-Synchrotron am NSLS und dem für Mainz vorgeschlagenen. Deutlich geringer ist mit  $\alpha = 0,036$  der Momentum-Compaction-Faktor der hier untersuchten DBA-Struktur (Tab. 10.2).

### 10.2.2 Vergleich von DBA- und FODO-Struktur

Für die Auswahl der Synchrotron-Struktur ist maßgebend die Effektivität des Injektionsprozesses, die von der Energieakzeptanz, dem Synchrotrontune und der Strahldimension bestimmt wird. Die Energieakzeptanz ist durch die HF gegeben und wird berechnet zu

$$\left( \frac{\Delta E}{E} \right)_{HF} = \sqrt{\frac{2U_0}{\pi \alpha h E} [q^2 - 1] - \arccos(1/q)} \quad (10.2)$$

mit dem Overvoltage-Faktor

$$q = \frac{V_{cav}}{U_0/e} \quad (10.3)$$

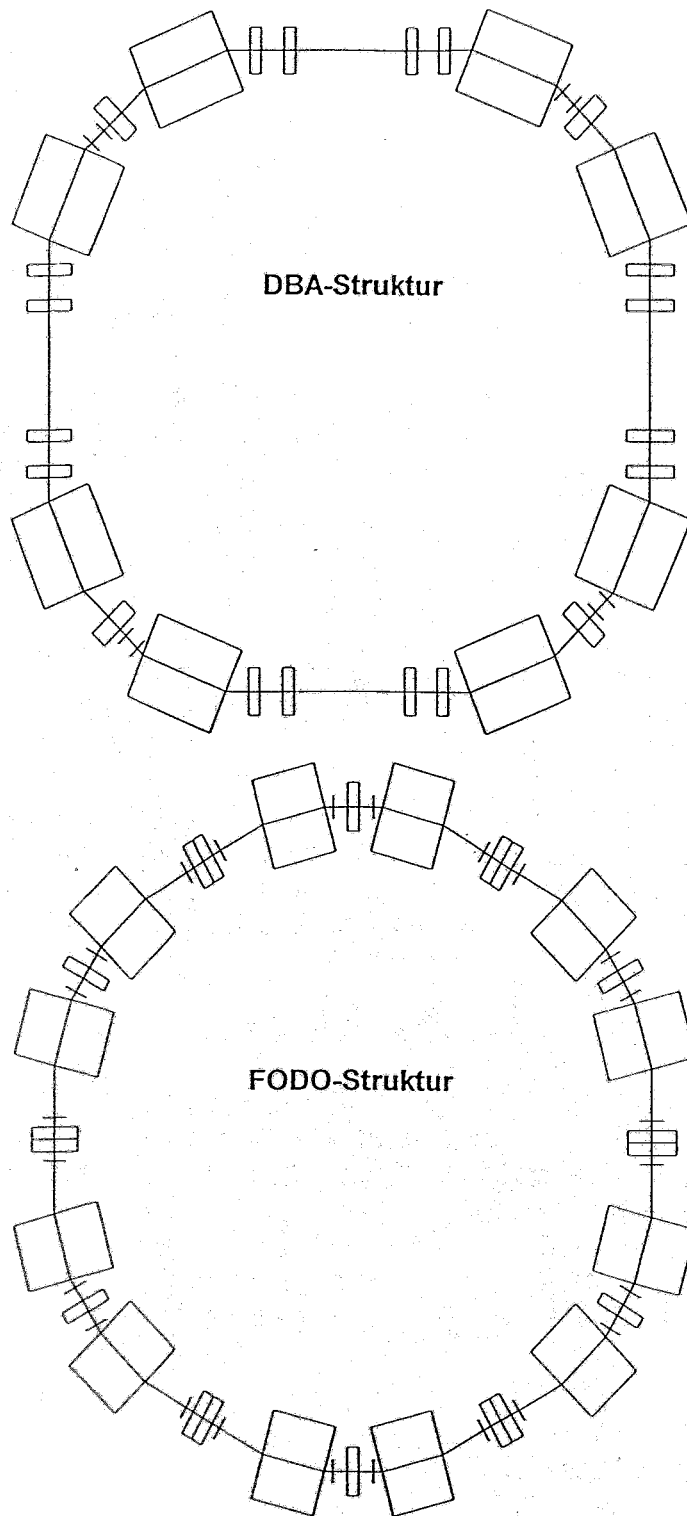


Abb. 10.2: Schematischer Aufbau des Booster-Synchrotrons in DBA- und FODO-Struktur

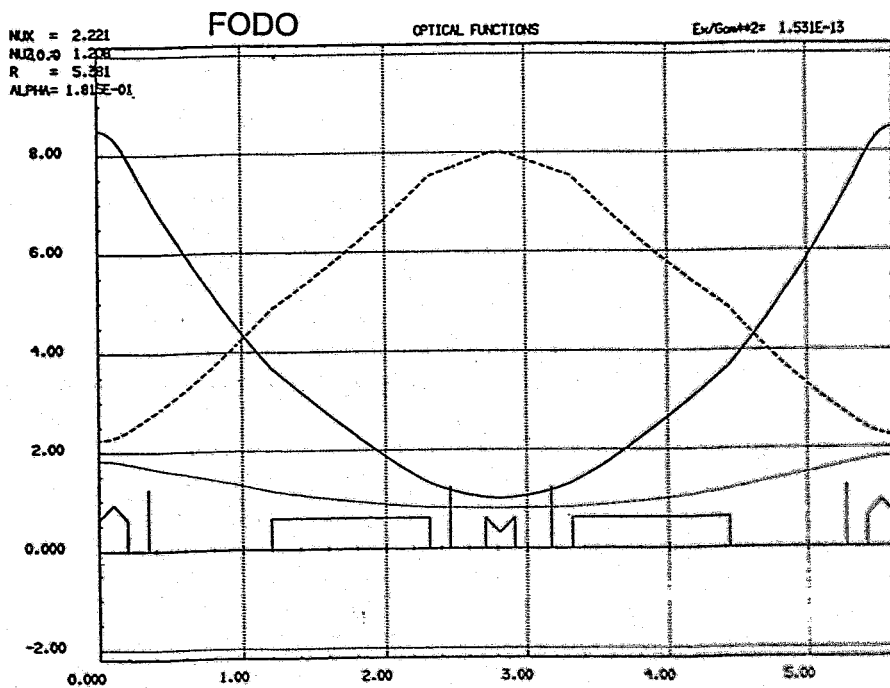
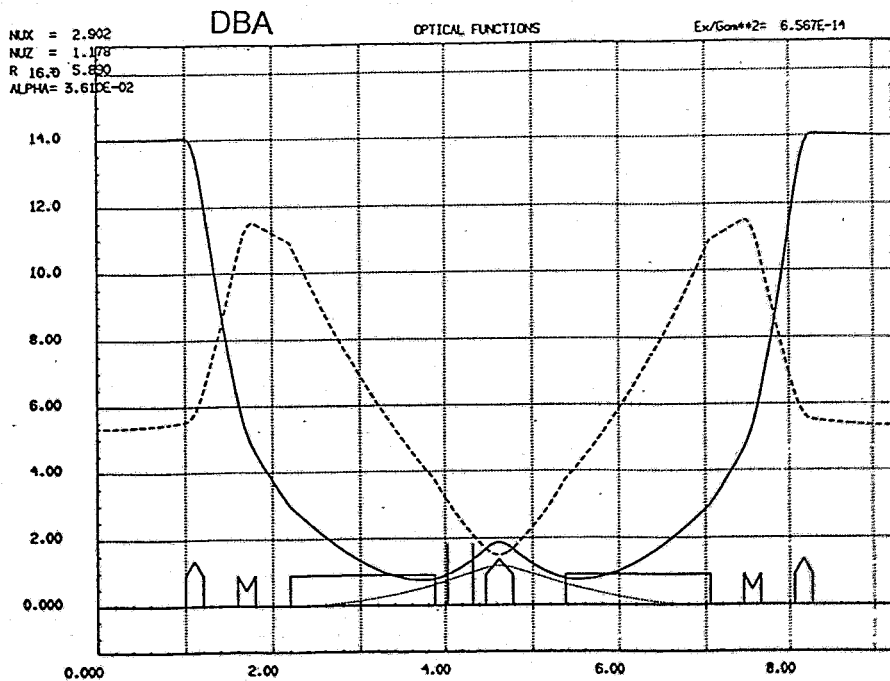


Abb. 10.3: Verlauf der Maschinenfunktionen  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  und  $\eta_x$  im Booster-Synchrotron für die beiden Strukturen DBA und FODO ( $\beta_x$  - durchgezogene,  $\beta_y$  - gestrichelte,  $\eta_x$  - punktierte Kurve)

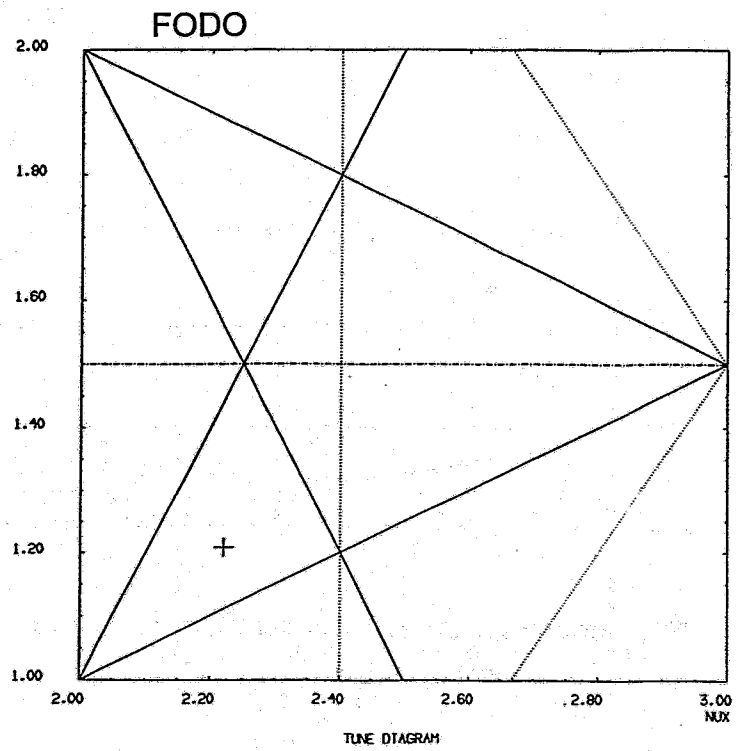
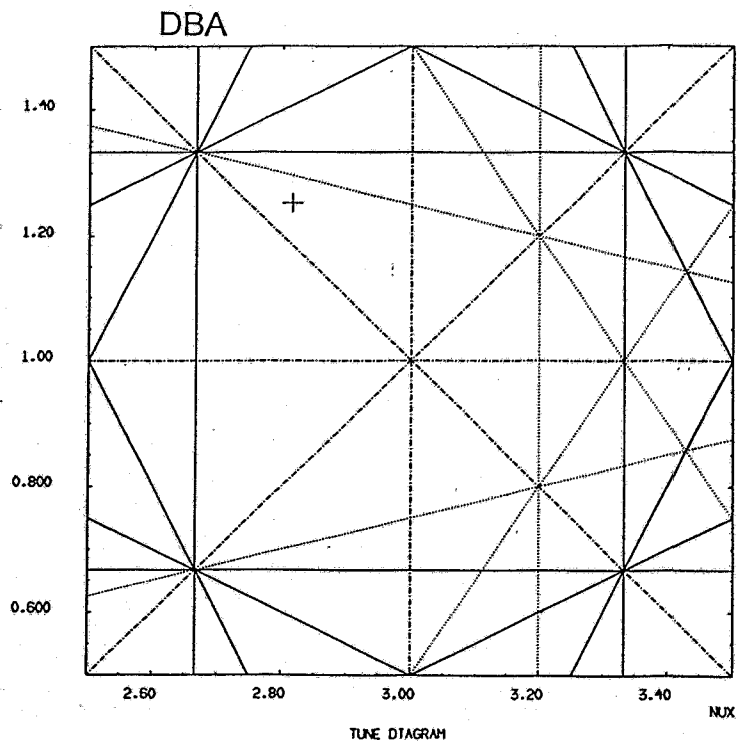


Abb. 10.4: Arbeitspunkt des Booster-Synchrotrons für die beiden Strukturen DBA und FODO

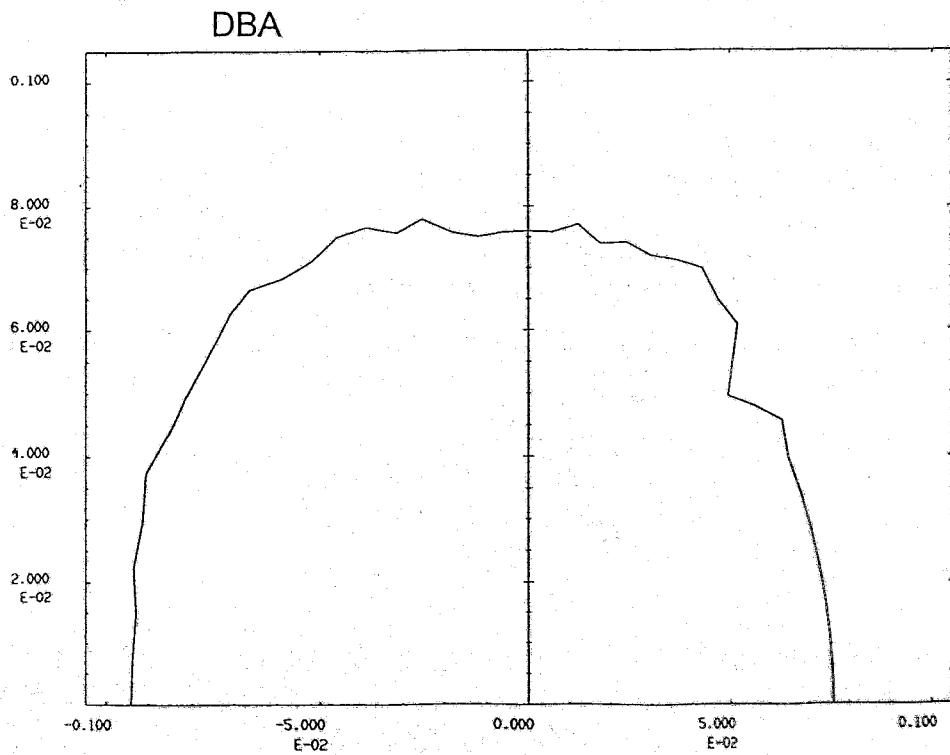
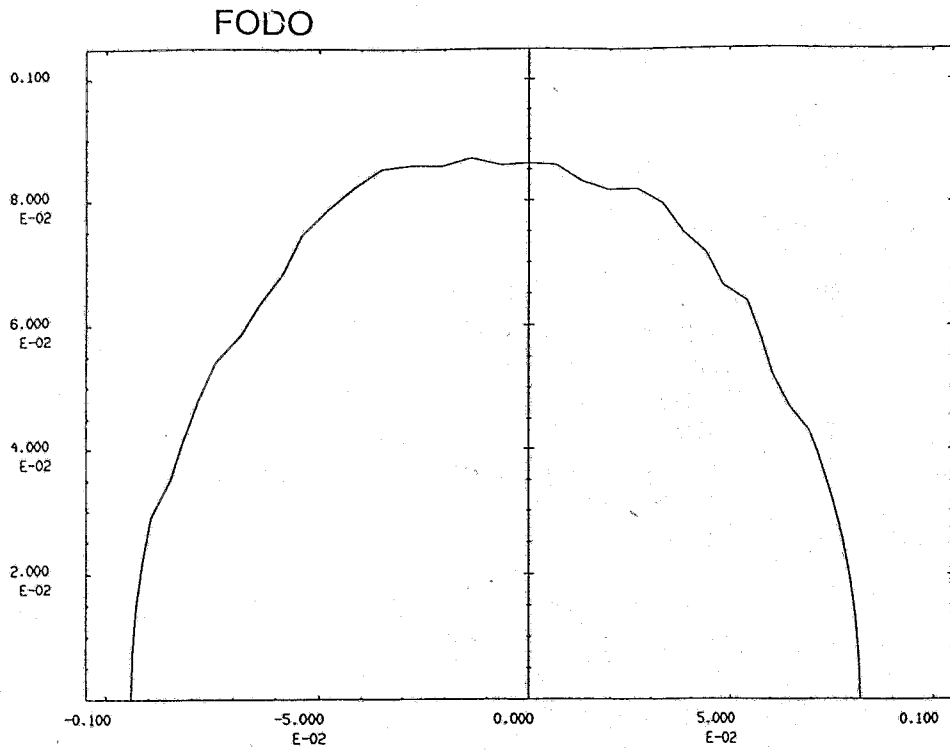


Abb. 10.5: Dynamische Apertur des Booster-Synchrotrons für die beiden Strukturen DBA und FODO. Die Anordnung der Sextupole ist in Abb. 10.3 wiedergegeben.

und der pro Umlauf abgestrahlten Photonenenergie

$$U_0[\text{keV}] = \frac{88,5(E[\text{GeV}])^4}{\rho[\text{m}]} \quad (10.4)$$

Außerdem bedeuten:

- E Energie der Elektronen
- $\alpha$  Momentum-Compaction-Faktor
- h Harmonische Zahl
- q Überspannungsfaktor ( $q = 1/\sin \Psi$ )
- $U_0$  Energieabstrahlung für ein Elektron bei einem Umlauf
- $V_{\text{CAV}}$  Cavity-Spitzenspannung
- e Elementarladung
- ( $\pi = 3,14$ ).

Bei der Berechnung der Energieakzeptanz steht der Momentum-Compaction-Faktor  $\alpha$  im Nenner des Wurzelausdrucks, d.h. je kleiner  $\alpha$  ist, um so größer ist die Energieakzeptanz. Die Energieakzeptanz ist in Abb. 10.6 für beide Varianten und vier Elektronenenergien zwischen 22 und 800 MeV wiedergegeben. Um eine Energieakzeptanz von 1 % ( $10^{-2}$ ) für 22 MeV - Elektronen zu erreichen, wird für die DBA-Struktur eine Cavity-Spannung von 5,5 kV benötigt. Die gleiche Energieakzeptanz wird bei der FODO-Struktur erst bei 25 kV erzielt!

Die HF-Spannung darf nicht beliebig hoch gewählt werden, um Teilchenverluste durch Kopplung von Synchrotron- und Betatronschwingungen zu vermeiden. Der Arbeitspunkt in longitudinaler Richtung wird durch den Synchrotron-Tune  $\nu_s$  bestimmt. Der Synchrotron-Tune wird als Verhältnis aus Synchrotronfrequenz  $\Omega_s$  und Umlauffrequenz  $\omega_0$  berechnet zu

$$\nu_s = \frac{\Omega_s}{\omega_0} = \sqrt{\frac{\alpha h V_{\text{CAV}} \sqrt{1 - \frac{1}{q^2}}}{2\pi E/e}} \quad (10.5)$$

wobei  $\cos \Psi = \sqrt{1 - \frac{1}{q^2}}$  ist.

Für die beiden untersuchten Strukturen ist der Verlauf von  $\nu_s$  in Abb. 10.7 dargestellt. Danach betragen die  $\nu_s$  für die beiden betrachteten Fälle bei entsprechender Cavity-Spannung für 1% Energieakzeptanz

DBA  $\nu_s = 7,9 \cdot 10^{-3}$

FODO  $\nu_s = 3,6 \cdot 10^{-2}$ .

Tab. 10.2: Elektronenoptische Parameter des Booster-Synchrotrons

Magnetstruktur	DBA	FODO
Elektronenenergie [MeV]	800	800
Injektionsenergie [MeV]	22	22
Umfang [m]	37,453	34,648
Periodizität	4	6
Hochfrequenz [MHz]	352,2	352,2
Harmonische Zahl	44	40
Max. Strom (Multibunch) [mA]	20	20
Max. Strom (Singlebunch) [mA]	5	5
Natürl. Emittanz [ $\pi$ mm mrad]	0,161	0,375
Arbeitspunkte $Q_x/Q_z$	2,902 / 1,178	2,221 / 1,208
Natürl. Chromatizität $X_x/X_y$	-5,528 / -0,874	-4,380 / -0,639
Momentum Compaction Factor $\alpha$	0,036	0,182
Relative Energieunschärfe	$0,463 \cdot 10^{-3}$	$0,420 \cdot 10^{-3}$
$\beta_x(\max) / \beta_x(\min)$ [m/rad]	14,06 / 0,79	8,50 / 1,01
$\beta_y(\max) / \beta_y(\min)$ [m/rad]	11,50 / 1,50	8,00 / 2,25
$\beta_x / \beta_y$ (Mitte geraden Stückes) [m/rad]	13,99 / 5,34	8,50 / 2,25
Max. Dispersionsfunktion [m]	1,19	1,83
Dispersionsfunkt. im geraden Stück [m]	0	1,40
Ablenkradius [m]	2,135	2,135
$M_{\max}$ auf dem Orbit [T]	1,25	1,25
Gradient im Dipol [T/m]	0	0
Anzahl der Quadrupole	20	12
Max. Gradient $g$ [T/m] / Stärke [m <sup>-2</sup> ]	12,8 / 4,8	4,5 / 1,7
Anzahl der Sextupole	8	24
Sextupolstärken ( $S^* l$ ) [m <sup>-2</sup> ]	20	1
Dämpfungskonstanten ( $J_x / J_z$ )	1,1 / 0,9	0,54 / 1,46

Wegen der möglichen Kopplungen zwischen Synchrotron- und Betatronschwingung sollte  $\nu_s \leq 10^{-2}$  sein. Diese Bedingung ist nur mit der DBA-Struktur zu erfüllen.

Unterschiede in den Dispersionsfunktionen beider Strukturen führen wegen

$$\Delta x_E = \eta \frac{\Delta E}{E} \quad (10.6)$$

zu unterschiedlicher Strahlaufweitung. Für die DBA-Struktur ist im geraden Stück die Dispersionsfunktion gleich Null und im Dipolmagneten maximal 1,19 m (Tab 10.2 und Abb. 10.3). Damit folgt eine maximale Strahlaufweitung bei 1% Energieunschärfe von  $\Delta x_E = \pm 12$  mm. Wegen  $\eta = 0$  am Injektionsort (gerader Abschnitt) führt die Energieunschärfe zu keiner Strahlaufweitung im Injektionsprozeß. Für die FODO-Struktur beträgt die Dispersionsfunktion im geraden Stück  $\eta = 1,40$  m. Die maximale Dispersionsfunktion erreicht einen Wert

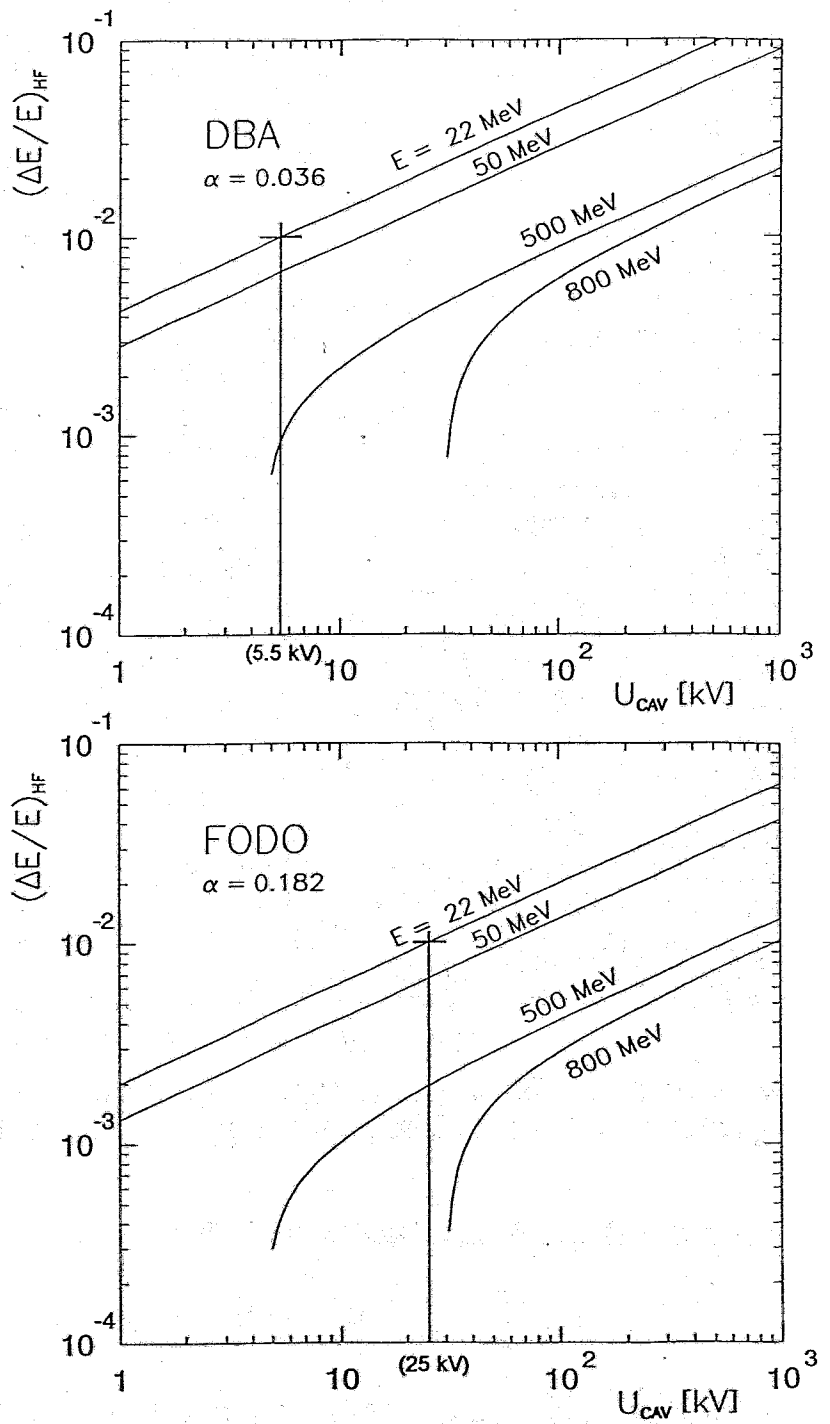


Abb. 10.6: HF-bedingte Energieakzeptanz des Booster-Synchrotrons für DBA- und FODO-Struktur bei der Frequenz  $f = 352,2$  MHz (LEP-System) in Abhängigkeit von der Cavity-Spannung und der Elektronenenergie. Der Wert für 1% Energieakzeptanz bei der Injektionsenergie 22 MeV ist gekennzeichnet.



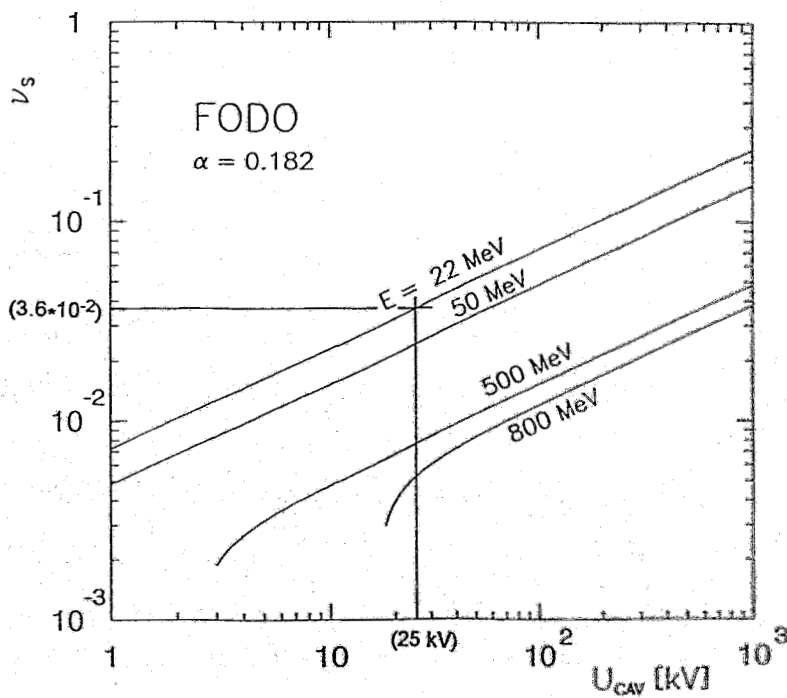
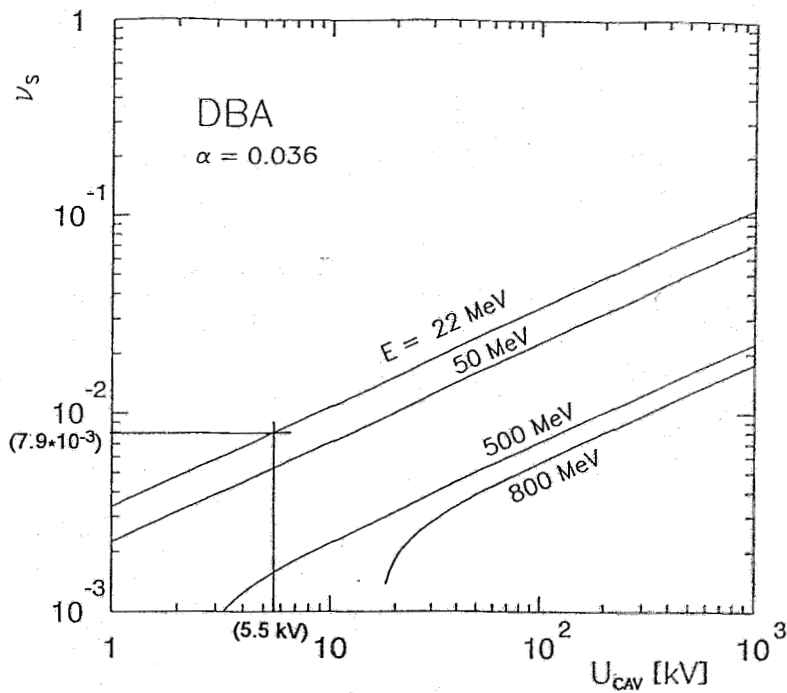


Abb. 10.7: Synchrotron-Tune  $\nu_s = \Omega_s / \omega_0$  als Verhältnis von Synchrotronfrequenz  $\Omega_s$  und Umlauffrequenz  $\omega_0$  für DBA- und FODO-Struktur in Abhängigkeit von der Cavity-Spannung und Elektronenenergie bei  $f = 352,2$  MHz. Der Wert für 1% Energieakzeptanz bei der Injektionsenergie 22 MeV ist gekennzeichnet.

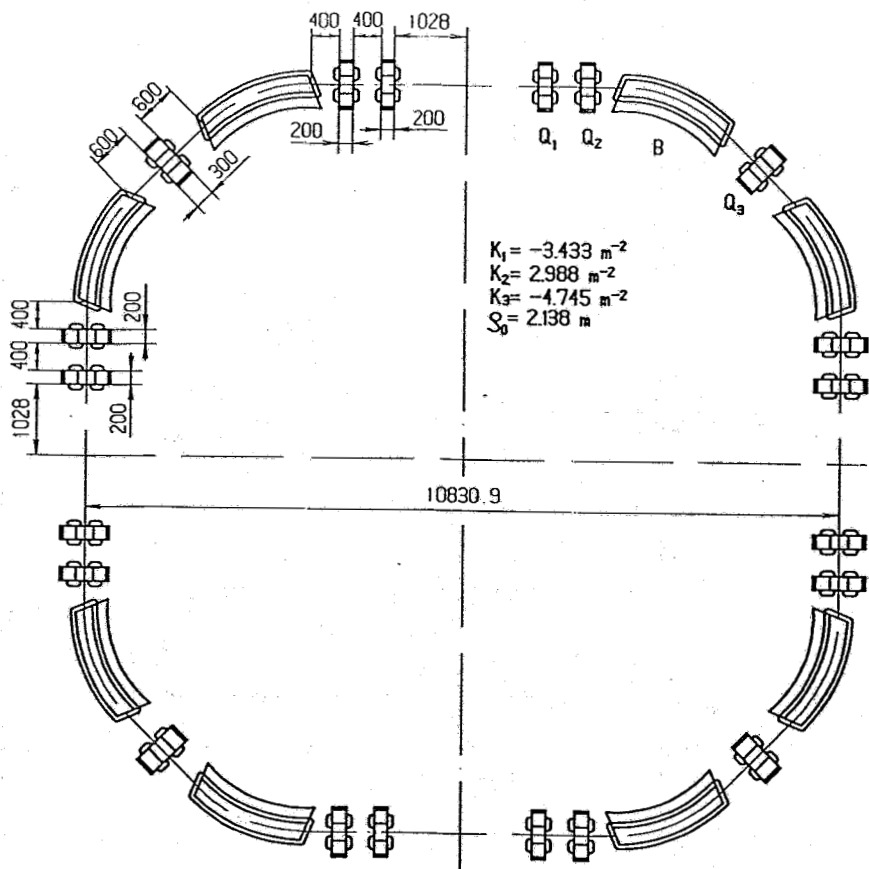


Abb. 10.8: Das 800 MeV Booster-Synchrotron in DBA-Struktur mit Maßangaben

von 1,83 m, was dann einen Strahlquerschnitt von  $\pm 12$  mm bis  $\pm 24$  mm zur Folge hat.

Die Dämpfungszeiten für Betatron- und Synchrotronschwingungen werden berechnet zu

$$\tau_i [ms] = \frac{U[m] \rho[m]}{13,2 J_i (E[GeV])^3} \quad (10.6)$$

mit U Umfang des Synchrotrons (DBA: 37,453 m; FODO: 34,648 m)  
 ρ Ablenkradius (2,135 m)  
 E Elektronenenergie (0,022 GeV)  
 J<sub>i</sub> Dämpfungs konstanten

DBA: J<sub>x</sub> = 1,1 J<sub>y</sub> = 0,9

FODO: J<sub>x</sub> = 0,54 J<sub>y</sub> = 1,46.

(Die Zahlenangaben sind der Tab. 10.2 entnommen.)

Bei der Einschußenergie von 22 MeV betragen die Dämpfungszeiten für

$$\begin{array}{ll} \text{DBA:} & \tau_x = 517 \text{ s} \quad \tau_y = 632 \text{ s} \\ \text{FODO:} & \tau_x = 975 \text{ s} \quad \tau_y = 360 \text{ s}. \end{array}$$

Praktisch findet während der Injektion keine Dämpfung statt, so daß die Struktur mit dem kleineren Strahlquerschnitt (DBA) günstiger ist.

Im Ergebnis zeigt der Vergleich der beiden optischen Strukturen deutlich den Vorteil des DBA-Konzeptes, für das sich im Rahmen dieser Studie auch entschieden wurde. Eine mit Maßen versehene Zeichnung dieses Booster-Synchrotrons ist in Abb. 10.8 wiedergegeben. Das vierzählige DBA-Lattice enthält ausreichend Platz für die Aufnahme der Elemente für Injektion, Ejektion, HF-Cavities und Strahldiagnose.

### 10.3 Transferweg

Um die Strahltransportwege kurz zu halten, sind Vorinjektor und Booster-Synchrotron innerhalb des Speicherringes angeordnet. Strahlenschutzmäßig werden beide Beschleuniger als eine Einheit abgeschirmt.

Es sind zwei Strahltransportsysteme erforderlich: vom Vorinjektor zum Booster-Synchrotron und vom Booster zum ROSY-Speicherring. Der Transferweg vom 22 MeV Mikrotron zum Booster-Synchrotron wird entsprechend BESSY I [Eg 83] aufgebaut (Abb. 10.9).

Das Transportsystem vom Booster-Synchrotron zum Speicherring muß die Anpassung der Maschinenfunktionen zwischen dem Booster-Synchrotron und dem Speicherring durchführen (Abb. 10.10). Da bei ROSY in einem Bereich injiziert wird, in dem die Dispersionsfunktion nicht Null ist, müssen insgesamt sechs Parameter angepaßt werden:  $\beta_x$ ,  $\beta_y$ ,  $\eta_x$  und  $\beta_x'$ ,  $\beta_y'$ ,  $\eta_x'$ . Dazu sind mindestens sechs Elemente (Quadrupole, Ablenkmagnete) nötig. Zum Erreichen hoher Flexibilität wird der Transferweg aus insgesamt 8 Quadrupolen und 2 Ablenkmagneten aufgebaut, wobei die beiden Ablenkmagnete zur Anpassung der Dispersionsfunktion benötigt werden. Der Verlauf der maschinenoptischen Funktionen ist in Abb. 10.11 wiedergegeben. Einzelheiten der Systeme für Ejektion und Injektion sind in den Zeichnungen (Abb. 10.12 und 10.13) dargestellt.

Mit Hilfe der Septa  $S_1$  und  $S_2$  (Abb. 10.11 und 10.12) wird der Strahl bei einer Ablenkung von insgesamt  $10^\circ$  aus dem Booster-Synchrotron ejiziert. Diese beiden Elemente sind identisch aufgebaut und werden in Reihe geschaltet. Dadurch wird die Auswirkung von Justagefehlern und nichtoptimalem Betrieb minimiert. Ein anschließendes Quadrupol-Dublett fokussiert den Strahl auf etwa gleichgroße Strahlquerschnitte in x- und y-Richtung am Ort des Ablenkmagneten  $B_{T1}$ . Mit einer Emittanz von  $\varepsilon_x = 0,15 \pi \text{ mm mrad}$  und einer Amplitu-

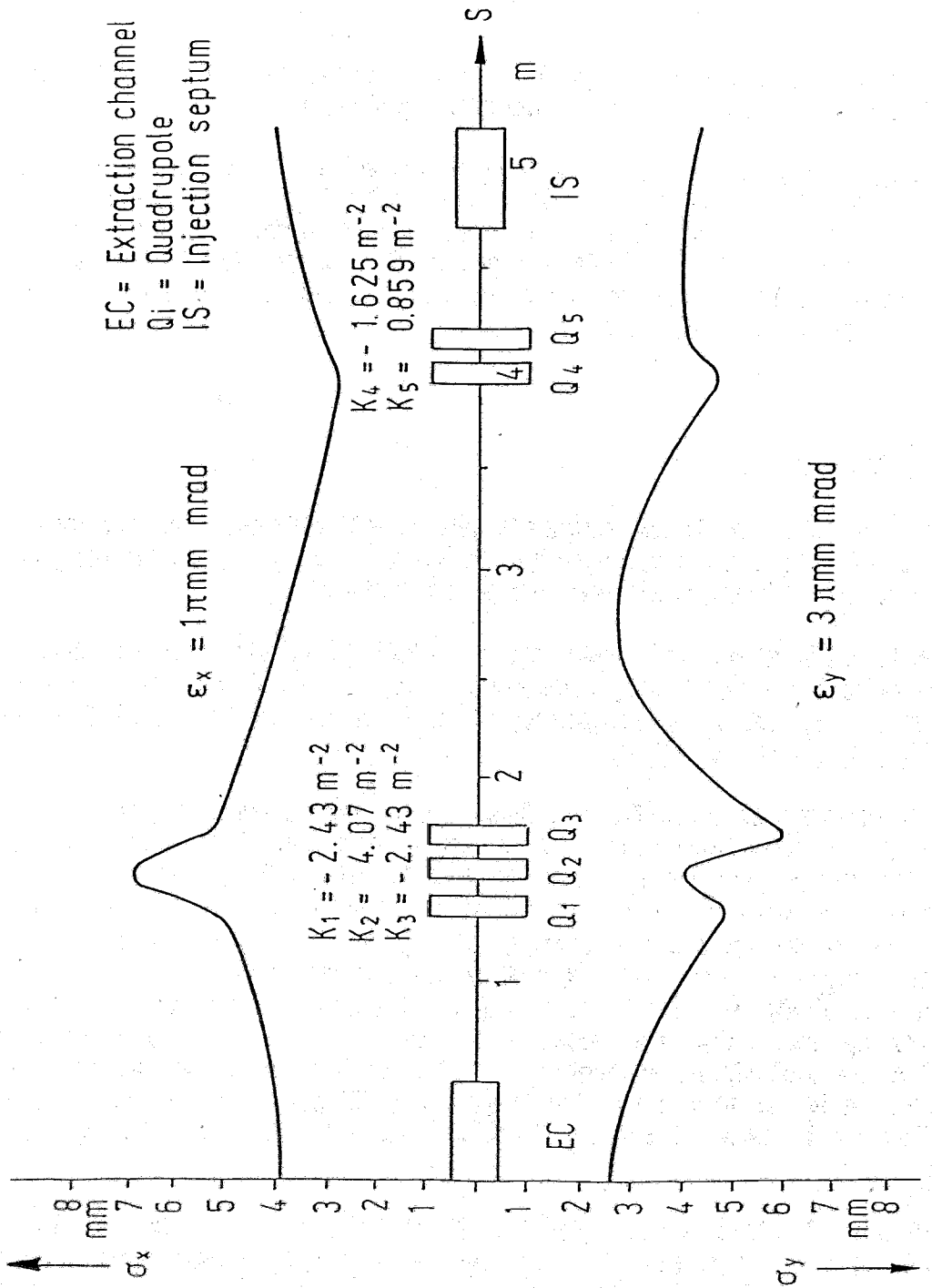
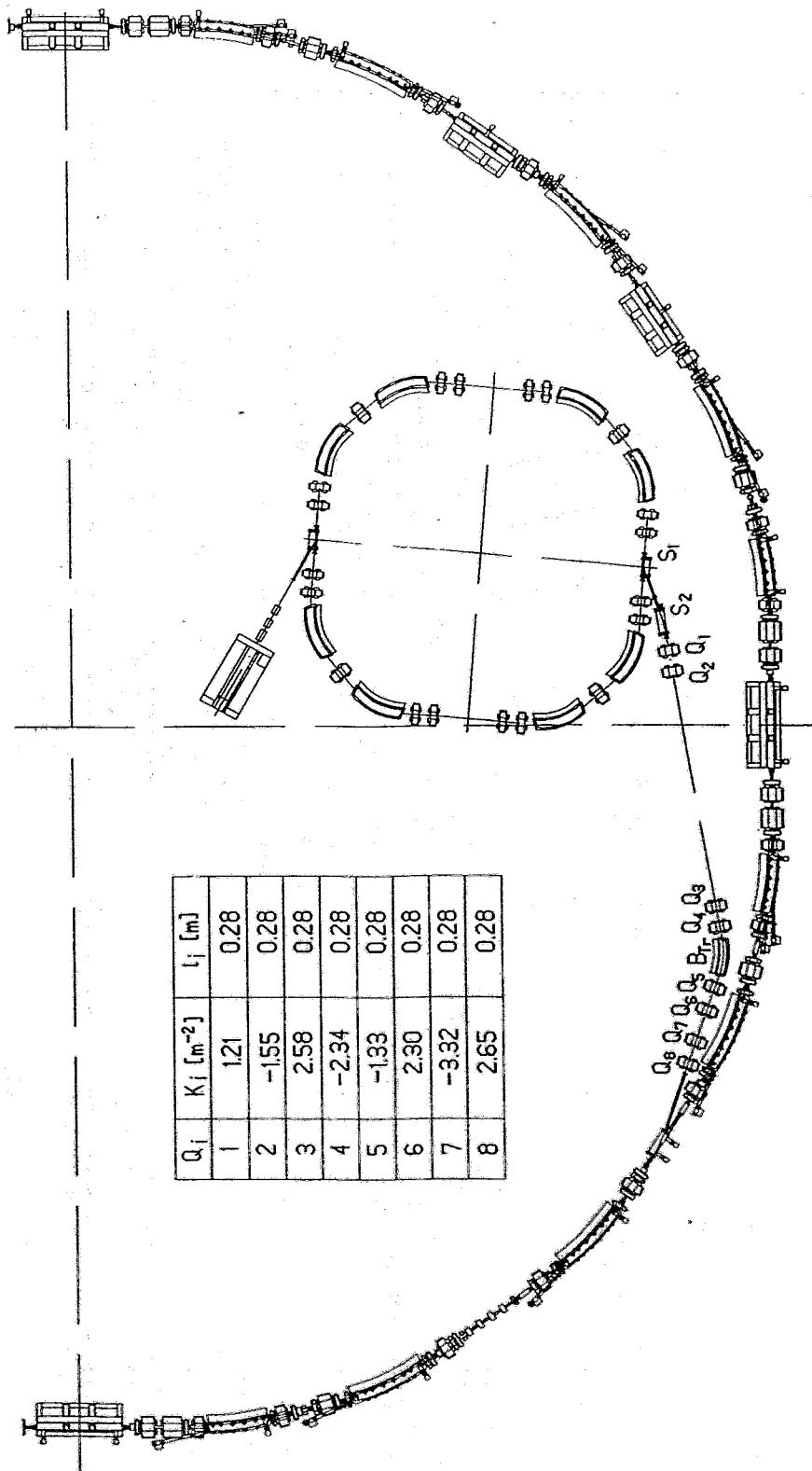


Abb. 10.9: Transferweg vom Mikrotron zum Booster-Synchrotron



$Q_i$	$K_i$ [ $m^{-2}$ ]	$l_i$ [m]
1	1.21	0.28
2	-1.55	0.28
3	2.58	0.28
4	-2.34	0.28
5	-1.33	0.28
6	2.30	0.28
7	-3.32	0.28
8	2.65	0.28

Abb. 10.10: Das Injektionssystem ROSY

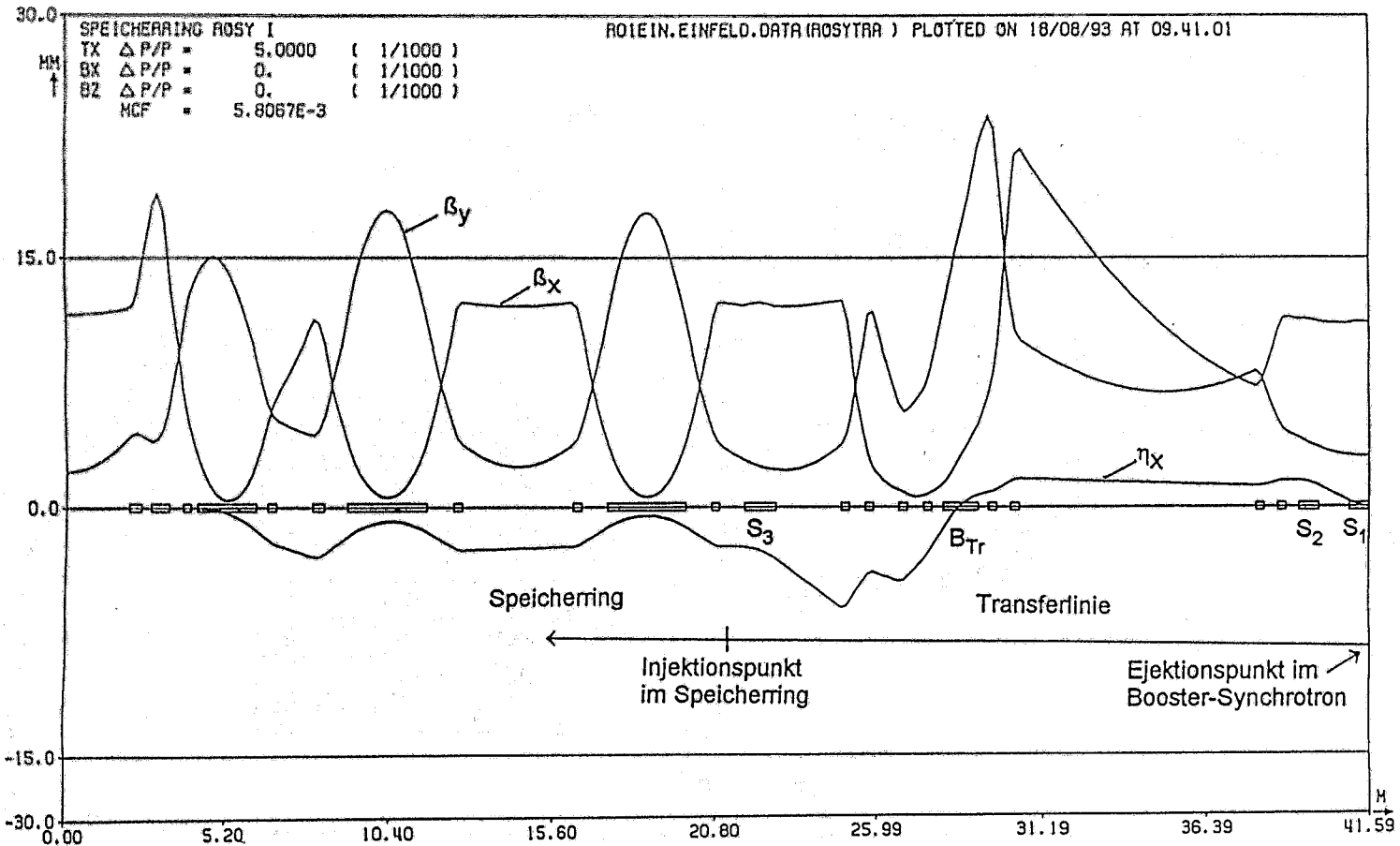


Abb. 10.11: Verlauf der Maschinenfunktionen  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  und  $\eta_x$  im Transferweg zwischen Booster-Synchrotron und Speicherring.

- |  |  |
|--|--|
| S <sub>1</sub> : Septum im Booster-Synchrotron | S <sub>3</sub> : Septum im Speicherring        |
| S <sub>2</sub> : Septum im Transferweg         | B <sub>Tr</sub> : Bendingmagnet im Transferweg |

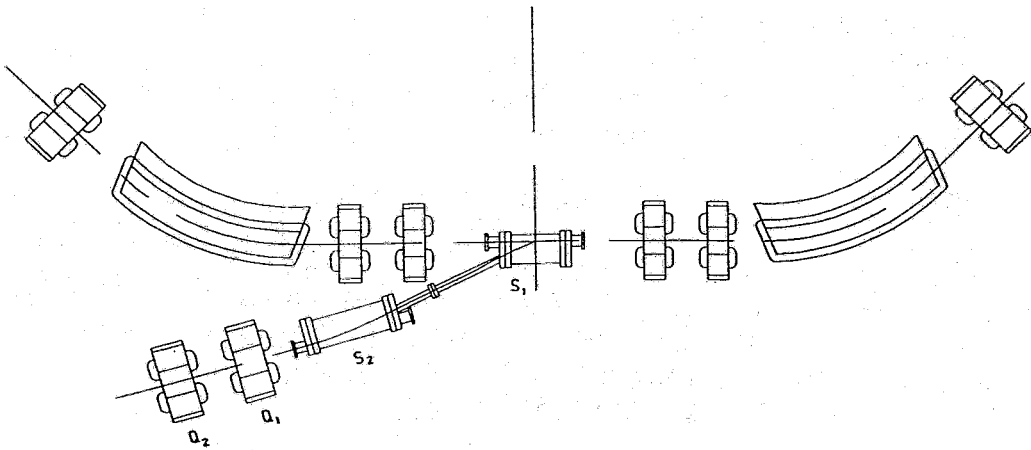


Abb 10.12: Die Ejektion aus dem Booster-Synchrotron.

- S<sub>1</sub>: Septum im Booster-Synchrotron
- S<sub>2</sub>: Septum im Transferweg
- Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>: Qadrupole

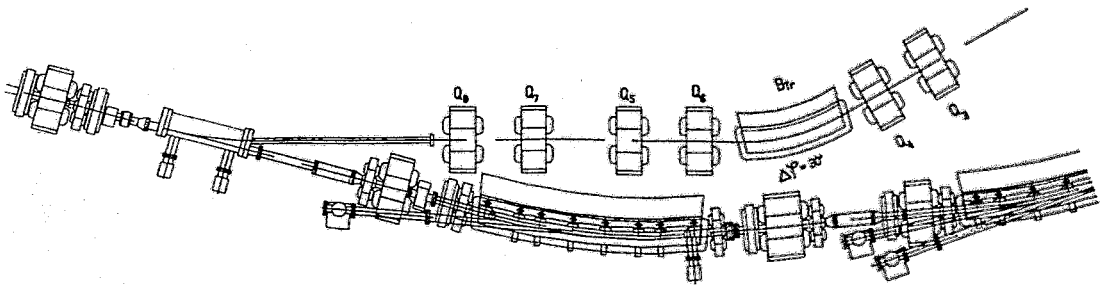


Abb. 10.13: Die Injektion in den Speicherring.

- S<sub>3</sub>: Septum im Speicherring
- B<sub>Tr</sub>: Bendingmagnet im Transferweg
- Q<sub>3</sub>-Q<sub>8</sub>: Qadrupole

denfunktion von  $\beta_x \leq 20$  m/rad ergeben sich Strahlquerschnitte von  $\sigma_x = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x} \leq 1,7$  mm. Der Beitrag zum Strahlquerschnitt infolge Energieunschärfe (ca.  $0,5 \cdot 10^{-3}$ ) und endlicher Dispersionsfunktion (0,2 m) ist  $\Delta x_e = 0,1$  mm. Somit ist der Strahlquerschnitt ( $\sigma$ ) kleiner als 2 mm. Die für diesen Bereich geforderten Gaphöhen (Magnete, Quadrupole) liegen in der Größenordnung von 30 - 40 mm. Demzufolge können relativ kleine Magnete verwendet werden.

Mit Hilfe des Ablenkmagneten  $B_{Tr}$ , der eine Ablenkung von  $30^\circ$  hat, gelangt der Elektronenstrahl zum Injektionsseptum ( $\Delta\phi = 15^\circ$ ) innerhalb des Speicherrings. Zur Erreichung hoher Flexibilität, um den injizierten Strahl auch an andere ( $\beta_x, \beta_y$ )-Parameter anpassen zu können, werden in diesem Abschnitt 4 Quadrupole ( $Q_5 - Q_8$ ) benötigt. Die Anpassung des injizierten Strahls an die Bedingungen im Speicherring ist aus Abb. 10.12 zu entnehmen. Die Injektion in den Speicherring ist in Abb. 10.13 wiedergegeben.

Unter der Annahme eines maximalen Gradienten in den Quadrupolen von 20 T/m ergeben sich Längen von 5 - 10 cm für die Quadrupole. Das bedeutet, die Abmaße der Quadrupole können relativ klein gewählt werden.



# 11 Strahldiagnose und Instrumentierung

## 11.1 Einleitung

Für die Inbetriebnahme wird eine Reihe von Ausrüstungen benötigt, die eine effektive Messung der kritischen Maschinenparameter während der Inbetriebnahme ermöglichen und auch im späteren Betrieb über das Kontrollsystem den Zugriff zu diesen Werten erlauben. Weitere Instrumentierung ist notwendig um die volle Leistungsfähigkeit der Maschine zu erreichen und laufend zu gewährleisten. Deshalb sind alle wichtigen Strahlparameter ständig zu messen und für den Operator verfügbar zu halten. Die Lage der einzelnen Komponenten für die Instrumentierung und Diagnose am Speicherring ist aus dem Übersichtsbild des Speicherringes Abb. 11.1 ersichtlich.

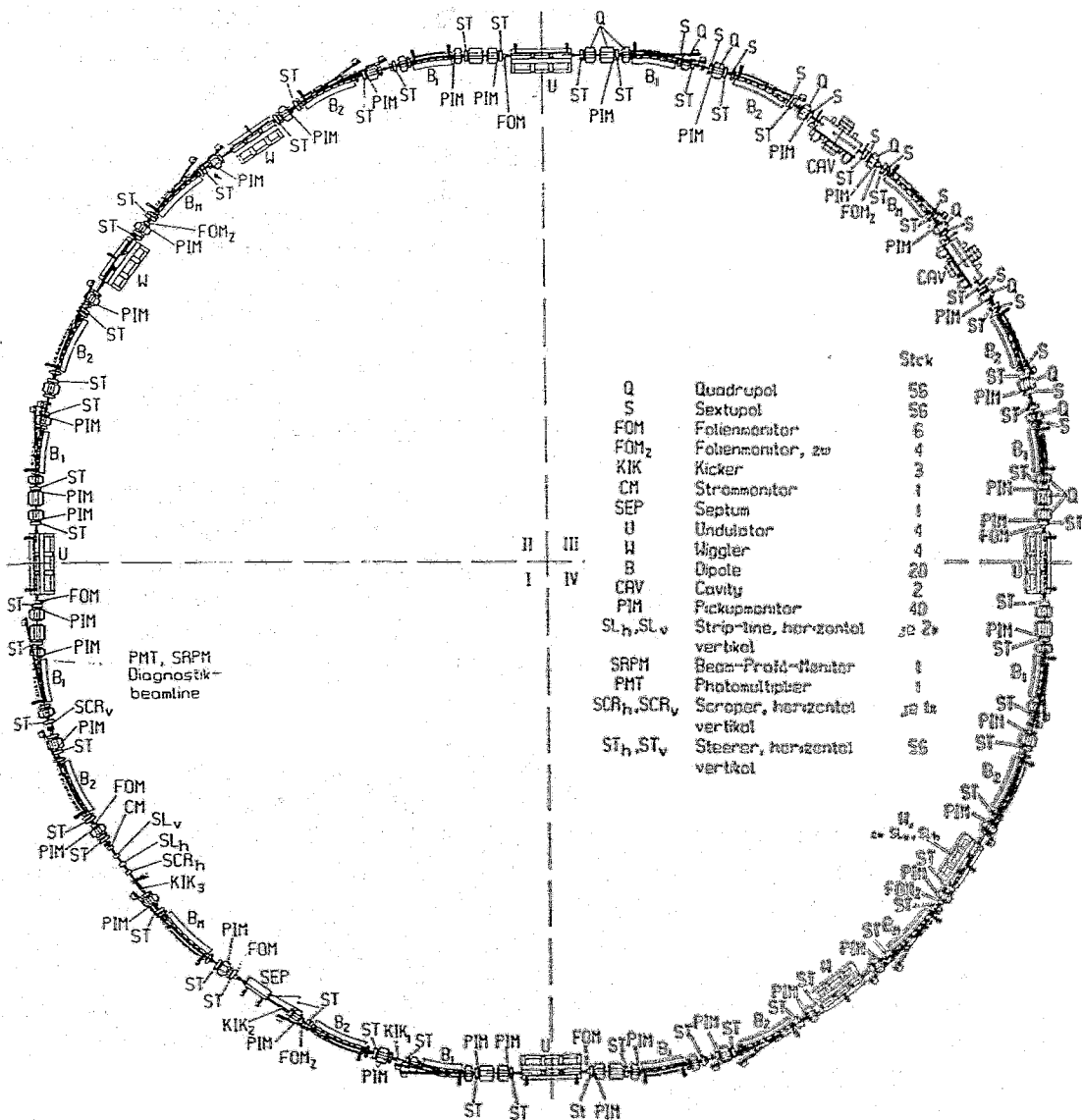


Abbildung 11.1: Diagnostikkomponenten im Speicherring

Weitere Elemente zur Strahldiagnose befinden sich am Ausgang des LINACs und in der Transferline und werden beim Füllen des Speicherringes benutzt. Ein Timing-System synchronisiert die gesamte Anlage und erlaubt das Speichern der unterschiedlichen Bucketsequenzen.

## 11.2 Beam-Position-Monitore (BPM)

Die Messung der Strahlposition muß folgenden Anforderungen gerecht werden:

- In der Inbetriebnahmephase muß eine Strahlpositionsmessung des injizierten Strahles möglich sein (zusätzlich zu den installierten Folienmonitoren), um den Strahl so steuern zu können, daß ein vollständiger Umlauf im Speicherring erreicht wird. Hierbei genügt eine Genauigkeit von  $\pm 1$  mm bei niedrigem Strahlstrom (0,1 bis 1 mA) aus, für die Messung steht jedoch nur das Signal von einem Strahldurchgang durch die jeweiligen Pick-up-Monitore zur Verfügung.
- Für die Korrektur des closed orbit ist die Messung der Lage des gespeicherten Elektronenstrahles in Bezug auf den idealen Orbit für einen Strahlstrom von 1 mA bis zum vollen Strom von 250 mA für die verschiedenen Bunchmodes nötig, um über das Kontrollsystem und die Steeringmagnete die nachfolgende Orbitkorrektur zu erreichen. Dabei kommen zwei Arten der Strahlpositionskorrektur zum Einsatz (siehe dazu auch Abschnitte 12.9.2 und 12.9.3). Zum einen muß ein stabiler closed orbit durch eine spezielle Hardwarelösung eines Feedbacksystems mit schneller Signalverarbeitung unter Steuerung und Überwachung durch das Kontrollsystem eingesetzt werden.  
Ein zweites schnelles Feedbacksystem muß an den einzelnen User-Beamlines für die Stabilisierung des Quellpunktes der Synchrotronstrahlung installiert werden. Dazu müssen zusätzlich zu den Signalen der Beam-Position-Monitore auch die Daten von Monitoren für die Synchrotronstrahlung der jeweiligen Beamline ausgewertet werden. Die Realisierung erfolgt durch Hardware in der Prozezebene des Kontrollsystems.

Die Notwendige Auflösung der Strahlpositionsmessung muß kleiner als 10  $\mu$ m bei einer absoluten Meßgenauigkeit von 150  $\mu$ m ( ESRF, DELTA, ELETTRA) sein. Die Messung der Strahllage erfolgt mit 40 Beam-Position-Monitoren (BPM). Die Signalgewinnung erfolgt aus Knopfmonitoren mit 4 Elektroden (PIM). Für die Signalverarbeitungselektronik wird vorgeschlagen, die Lösung von ELETTRA [Ei 89], [Bi 89], [Br 88], [Hi 89] zu übernehmen. Der mechanischen Aufhängung der Pick-up-Monitore (PIM) ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen, weil sie direkt die Meßgenauigkeit beeinflusst. Der Bezugs- und mechanische Befestigungspunkt ist der zugeordnete Quadrupol bzw. der Ein- oder Austritt aus einem Insertion-Device.

### 11.3 Folienmonitore

Zur Messung der Strahlgröße und des Strahlquerschnittes werden 9 Folienmonitore (FOM) mit der zugehörigen Fernsehtechnik (CCD-Kamera) eingesetzt. Die Bilder der CCD-Kameras werden über Module zur Bildverarbeitung in das Kontrollsystem übernommen und stehen im Kontrollraum zur Verfügung. Die Steuerung der Folienmonitore erfolgt durch Schrittmotore über das Kontrollsystem. Für die Konstruktion der Folienmonitore ist eine Übernahme vom DESY zweckmäßig [De 93]. Drei Folienmonitore (FOMz) werden nach der Inbetriebnahme des Speicherringes wieder ausgebaut.

### 11.4 Strommonitore

Ein DCCT (Abb. 11.2) ist ein bezüglich des zu messenden Strahles rückwirkungsfrei arbeitender Strommesser. Er wird über einen Keramikspalt (Gap) in einem geraden Stück des Speicherringes eingebaut. Ein DCCT ermöglicht die direkte Messung des mittleren Strahlstromes im Ring und damit die Kontrolle der Strahllebensdauer. Ein typisches Design [Un 81] arbeitet im Strombereich zwischen 0 und 500 mA bei einer Linearität von 0.001%, einer oberen Frequenzgrenze von 50 kHz und hat ein Eigenrauschen, das einem Strahlstrom von 5  $\mu$ A entspricht.

Ein DCCT besteht aus zwei gleichen Ferritkernen mit identischen, aber gegensinnig aufgebrachtten Erregerwicklungen, die von einem NF-Generator gespeist werden.

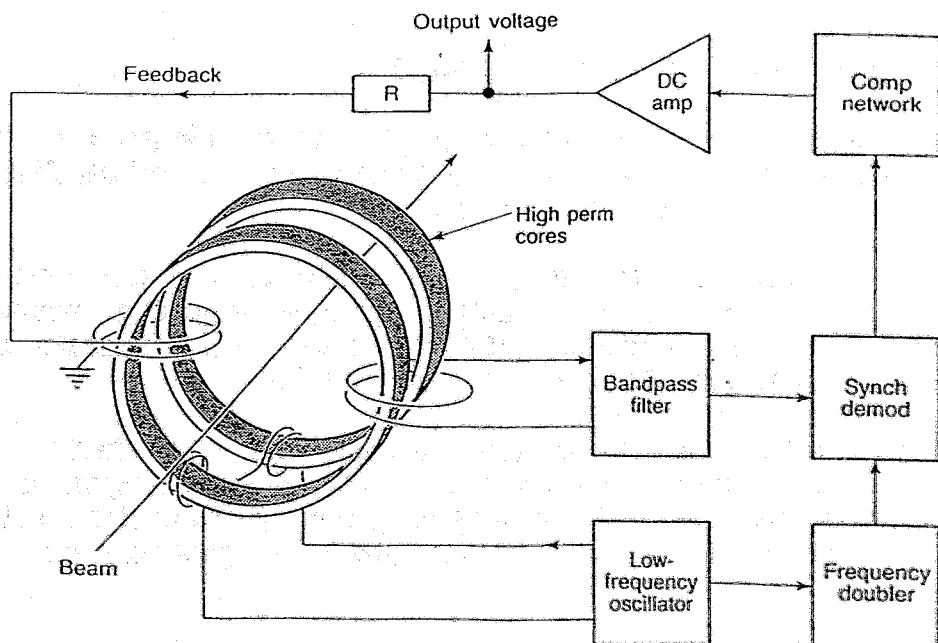


Abb. 11.2: Blockschaltbild des DCCT

Die über beide Kerne gewickelte Sensorspule detektiert bei exakt symmetrischem Aufbau kein Signal, wenn der durch den Ring fliegende Strahlstrom Null ist. Das Magnetfeld des Strahlstromes, dieser bildet die "Primärwicklung" des DCCT, induziert in der über beide Kerne gleichsinnig gewickelten Sensorspule eine Signalspannung, wobei der Signalanteil auf der zweiten Harmonischen der Erregerfrequenz selektiv ausgewertet wird. Diese Signalspannung wird gefiltert, in einem Synchrondemodulator gleichgerichtet, verstärkt und bewirkt über die Rückkopplungsspule eine Kompensation der vom Strahlstrom hervorgerufenen Störung des Systems. Dieses "Fehlersignal" ist proportional dem Strahlstrom und wird zur Weiterverarbeitung digitalisiert sowie angezeigt.

Für schnelle Strommessungen (first turn) wird das Summensignal des Pick-up-Monitors (PIM), der im Ring auf den letzten Injektionskicker folgt, ausgewertet.

## 11.5 Diagnosebeamline

Eine Beamline aus einem Bending-Magneten wird als Diagnosebeamline verwendet. Zur Messung der Intensität und der Zeitstruktur des Strahles wird ein Photomultiplier eingesetzt (PMT).

An der gleichen Beamline ist ein Beam-Profile-Monitor (SRPM) mit einer CCD-Kamera zur Signalaufnahme angeordnet (Bildauswertung wie bei den Folienmonitoren über Kontrollsystem).

## 11.6 Lebensdauer- und Tunemessung

Das erste gerade Stück des Speicherringes, das im Ring nach der Injektion folgt wird nicht für ein Insertion-Device genutzt, sondern wird als Einbauplatz für folgende Diagnoseeinrichtungen benötigt:

- Für eine genaue Vermessung der Strahldimensionen, der dynamischen Apertur sowie für die Strahllebensdauerbestimmung werden ein horizontaler (SCRh) und ein vertikaler Scraper (SCRv) eingesetzt, die über Kontrollsystem und Schrittmotoren gesteuert werden.
- Die Tune-Messung erfordert zwei Striplines (SL) für die horizontale und vertikale Anregung des Strahles durch einen Signalgenerator. Die Messung erfolgt durch Auswertung der Signale eines geeignet gelegenen Pick-up-Monitors (PIM) mit einem kommerziellen Signalanalysator.

## 11.7 Allgemeine Instrumentierung

Zur genauen Messung der Feldstärke der Bending-Magneten wird in unmittelbarer Nähe des Speicherrings ein Referenzmagnet aufgestellt und dessen Feldstärke mit einer NMR-Meßeinrichtung gemessen.

Für Allgemeine Meßzwecke am Injektor, am Speicherring sowie im Kontrollraum wird eine Ausrüstung mit kommerziellen Meßgeräten, wie Frequenz- und Signalanalysatoren, Netzwerkanalysatoren, schnellen Transientenrecordern, Impulsgeneratoren und Digitaloszilloskopen benötigt. Die Geräte müssen über einen Interfaceanschluß verfügen, damit sie an das Kontrollsystem anschließbar sind, um Messungen während des laufenden Betriebes an nicht zugänglichen Stellen durchführen zu können.

## 12 Kontrollsystem

### 12.1 Einführende Bemerkungen

Die meisten modernen Beschleunigerkontrollsysteme basieren auf den gleichen Prinzipien (siehe z.B. [Cr 89]): Einsatz einer verteilten Architektur und möglichst weitgehende Standardisierung von Hard- und Software in Richtung offener Systeme. Das ROSY-Kontrollsystem bildet keine Ausnahme. Sein Schwerpunkt liegt dabei zusätzlich auf einer hohen Transaktionsbandbreite und der Möglichkeit zur nahtlosen Erweiterung seiner Kapazität, aber auch Gesamtleistungsfähigkeit. Hierdurch kann über die gesamte Lebensdauer eine ausreichende Akzeptanz durch die Benutzer sichergestellt werden.

Die Architektur des ROSY-Kontrollsystems lehnt sich eng an das neue Kontrollsystem für den ELSA-Speicherring am Physikalischen Institut der Universität Bonn an.

Dieses Kapitel ist eine gekürzte Fassung des ROSY-Kontrollsystem Conceptual Design Report [Go 93].

### 12.2 Leitlinien für Entwurf und Implementierung

Für den Entwurf des Systems wurden die folgenden Leitlinien festgelegt:

- Die Basis bildet ein verteiltes System, bestehend aus mehreren, lose gekoppelten Ebenen. Hierdurch können Ausfallsicherheit, lange Standzeiten und ausreichende Skalierbarkeit erreicht werden.
- Das Kontrollsystem und speziell die Kommunikation innerhalb und zwischen den einzelnen Ebenen soll für den Anwender und Applikationsprogrammierer transparent sein.
- Für alle Hardware- und Software-Komponenten sollen standardisierte Komponenten eingesetzt werden. Dies ermöglicht eine deutliche Reduktion der Implementierungszeit und verringert den Wartungsaufwand.
- Für alle Softwarekomponenten soll eine einheitliche Entwicklungsumgebung auf Workstations, unterstützt durch CASE-Werkzeuge, verwendet werden. Die Programmiersprache wird einheitlich 'C' bzw. 'C++' auf allen Ebenen sein.

Kernelemente der Hardware werden RISC-Workstations unter dem UNIX- oder OSF/1-Betriebssystem sein. Das Betriebssystem UNIX (bzw. ein Derivat) wird aus Gründen der Portabilität und seiner ausgeprägten Eigenschaften zur Interoperabilität gewählt. In Anbetracht der technologischen Entwicklung auf dem Rechnersektor ist die Wahl von RISC-Workstations für den Einsatz im Kontrollsystem naheliegend, da diese Rechnerklasse heute das mit Abstand beste Preis/Leistungsverhältnis bietet und noch ein großes Innovationspotential besitzt, wie z.B. die PA-Architektur von Hewlett-Packard oder die Alpha-Architektur von DEC demonstriert.

Der Kern der Kontrollsystem-Software für ROSY soll vom Physikalischen Institut der Universität Bonn übernommen werden. Er entspricht im wesentlichen dem Kern des dort für den Elektronen-Stretcher-Ring ELSA entwickelten neuen Kontrollsystems. Das Man-Machine-Interface soll als eigenständige Applikation, aufsetzend auf dem Kontrollsystem-Kern, von ELETTRA (Sincrotrone Trieste) übernommen werden.

### 12.3 Architektur des ROSY-Kontrollsystems

Die Architektur des ROSY-Kontrollsystems besteht aus vier logischen Ebenen wie in Abbildung 12.1 dargestellt.

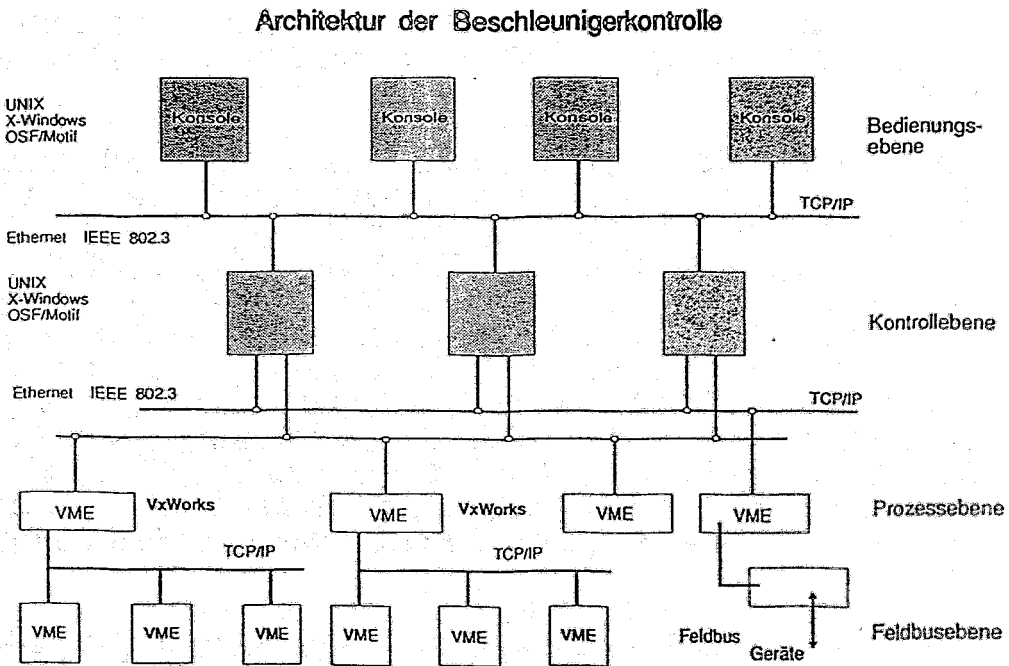


Abbildung 12.1: Hardware-Architektur des ROSY-Kontrollsystems

- Die *Konsolebene* bilden mehrere UNIX RISC Workstations mit dem X11-Grafiksystem und dem OSF/Motif 'Look-and-Feel'. Durch die Verwendung von X11 und Motif wird im Bereich der hochauflösenden Grafik eine weitgehende Standardisierung erreicht und dadurch der Zugriff auf eine Vielzahl kommerziell verfügbarer Software-Werkzeuge ermöglicht. Die grafische Benutzerschnittstelle - basierend auf dem bei ELETTRA entwickelten Interface - erlaubt die interaktive Kontrolle aller Parameter. Andere Applikationen (wie z.B. langsame Strahlage-Korrektur) werden ebenfalls auf der Konsolebene ablaufen.

- Die *Kontrollebene* besteht aus einem System vernetzter, leistungsfähiger UNIX RISC Workstations mit Server-Fähigkeiten und sehr guter Erweiterbarkeit. Dies wird gewährleistet durch den Einsatz eines standardisierten, zukunftssicheren Bussystems mit hoher Bandbreite. Jeder Rechner bearbeitet ein Subsystem des Beschleunigers, wobei die Definition eines Subsystems sich nach einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der Belastung (im Sinne des 'load balancing' bei Mehrprozessorsystemen) richtet. Durch die spezielle Architektur der Kontrollebene können jederzeit zusätzliche Rechner eingefügt werden, um erweiterten Erfordernissen gerecht zu werden.  
Die Kontrollrechner verwalten eine verteilte Online-Datenbank, deren Bestandteile auf den Einzelrechnern jeweils speicherresident gehalten werden. Die Datenbank spiegelt in der Gesamtheit der bedienten Parameter den aktuellen Beschleunigerzustand wieder. Auf diesem Spiegelbild arbeiten dann sogenannte 'Regelmaschinen' zur Berechnung komplizierterer Parameter-Abhängigkeiten und Korrelationen.  
In der Kontrollebene werden zusätzliche Rechner als universelle Server für Druckerdienste, Plattenplatz, relationale Datenbanken u.a. zum Einsatz kommen.
- Die *Prozeßebene* führt Aufgaben der Datenvorverarbeitung und Datenreduktion durch und verwaltet Kontroll- und Meßaufgaben durch dedizierte Tasks. Sie wird gebildet durch auf dem VME-Bus basierende Komponenten mit Prozessoren der Motorola MC68030/40-Familie. Für spezielle Aufgaben (z.B. Bilderfassung, Strahldiagnose und Feedback) werden diese CPUs durch Bildverarbeitungshardware und digitale Signalprozessoren ergänzt.
- Die *Feldbusebene* verbindet (soweit nicht besondere Anforderungen an Datendurchsatz o.a. vorliegen) alle Geräte der Beschleunigeranlagen und der Experimentestrahler mit dem Kontrollsystem und stellt die Kopplung zur Prozeßebene her. Sie wird realisiert durch low-cost VME-Komponenten und/oder ein Feldbussystem, welches sich als Industriestandard durchgesetzt hat.

Die Prozeßebene und die Feldbusebene bilden zusammen das Prozeß-System (siehe Abb. 12.2).

Für beide Ebenen kommt ein Echtzeitbetriebssystem zum Einsatz. Dieses System muß herausragende Netzwerkeigenschaften aufweisen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist das 'VxWorks'-System (siehe z.B. [VxKer]) der Wind River Company das am besten geeignete Produkt. Alle VME-Crates des Prozeß-Systems arbeiten ohne lokale Plattenkapazität. Die Prozessoren booten über die Server der Kontrollebene.

Das Kommunikationssystem zwischen den beiden oberen Schichten und dem Prozeßsystem basiert auf Ethernet (IEEE 802.3). Als physikalisches Übertragungsmedium kommt ein Glasfasersystem zum Einsatz. Die Topologie soll dabei so angelegt sein, daß ein einfacher Übergang auf FDDI gewährleistet ist.



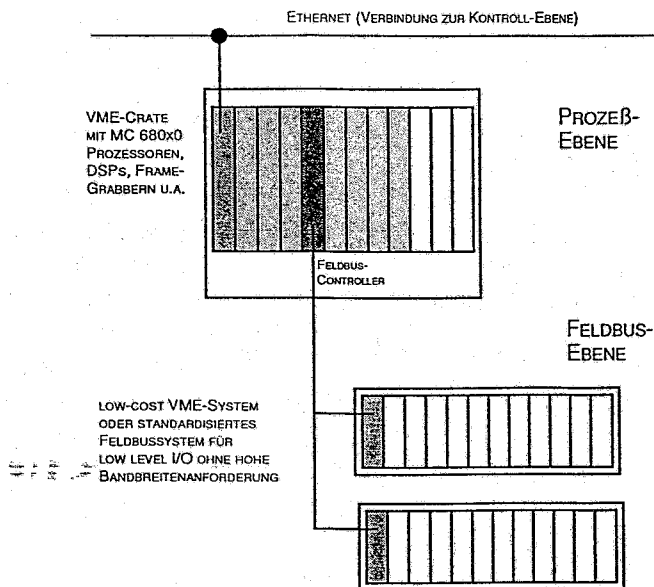


Abbildung 12.2: Prozeß- und Feldbus-System

Die konsistente Realisierung des Prozeßsystems mit VME-Komponenten und einem universellen Echtzeitsystem ermöglicht eine homogene Kommunikation mit Standardprotokollen (TCP/IP) für das gesamte Kontrollsystem. Die rechnerübergreifende Interprozeß-Kommunikation wird auf allen Ebenen durch synchrone oder asynchrone Message-Transfers abgewickelt. Datenwege mit hoher Bandbreite werden ausschließlich durch reine TCP-Socket Operationen realisiert. Hierbei kommen, falls nötig, Methoden der Datenkompression zum Einsatz (z.B. für digitalisierte Bilder oder Rohdaten des BPM-Systems).

#### 12.4 Erwartete Datenmengen, Parameterraufkommen und Bandbreite im Kontrollsystem

Das ROSY-Kontrollsystem zeichnet sich durch eine autonome Istwerterfassung im Prozeßsystem aus. Dies bedeutet, daß gemessene IST-Werte im Falle einer beobachteten Änderung automatisch an die nächst höhere Ebene (z.B. die Kontrollebene) übertragen werden. Dies bezieht sich auf digitale Meßgrößen (z.B. Statusmeldungen) und analoge Meßgrößen. Letztere werden nur dann neu gesendet, wenn eine signifikante Änderung festgestellt wurde. Die Bedingungen, unter denen die zu sendenden Parameter und damit die Datenrate bestimmt werden, sind vom Kontrollsystem dynamisch einstellbar. Dadurch kann eine Steuerung der Last und damit des Antwortverhaltens in gewissen Grenzen vorgegeben werden. Eine Ausnahme bilden die Rohdaten der Subsysteme zur Strahldiagnose, wie z.B. Spektren, Zeitsignale oder digitalisierte Bilder. Diese Daten werden nur auf Anfrage aus der Kontroll- oder Konsolebene übermittelt.

Die Erfahrung bei anderen Beschleunigern (ELSA, SPEAR, COSY u.a.) zeigt, daß bei einem Komplex der geplanten Größe mit einem Kanalaufkommen von etwa 8000-10000 I/O-Kanälen zu rechnen ist, wenn eine möglichst vollständige Abdeckung der Beschleunigeranlage erfolgen soll. Dabei entfallen erfahrungsgemäß ca. 70 Prozent auf 'digitale' Status- und Steuerkanäle, die keine analoge Ansteuerung bzw. Erfassung über DACs oder ADCs benötigen. Etwa 5 Prozent der I/O-Kanäle sind breitbandiger Natur und kommen im wesentlichen aus den Subsystemen zur Strahldiagnose. Der Rest der Kanäle teilt sich auf in Meß- und Steuergrößen, die über DACs und ADCs mit Wortbreiten zwischen 8 und 16 Bits abgebildet werden. Einen Schwerpunkt bilden die Power Converter der Hauptmagnete (Dipole, Quadrupole, Sextupole) des ROSY-Ringes, die aus maschinenphysikalischen Gründen eine Breite von mindestens 14 Bit erfordern. Die Steuergrößen sind meistens umfangreiche Datentabellen für Rampzyklen der Magnete, deren Übertragung und Verarbeitung möglichst schnell erfolgen muß.

Um eine hohe Benutzerakzeptanz des Kontrollsystems zu erreichen, muß eine gewisse Transaktionsbandbreite garantiert werden. Im Falle skalarer analoger Steuergrößen muß dabei pro aktivem Operateur eine Rate von deutlich mehr als 20 Transaktionen (abgeschlossenen Sollwertvorgaben) pro Sekunde erreicht werden, um das Gefühl einer 'quasi-analogen' Steuerung zu erzeugen. Dieses Merkmal ist, wie die Erfahrung zeigt, für das Commissioning und den Betrieb des Beschleunigers unverzichtbar. Die Erfahrung zeigt ebenfalls, daß die 'quasi-analoge' Steuerung ein wichtiges Hilfsmittel zur zeitlichen Minimierung der Commissioning-Phase ist.

Das ROSY-Kontrollsystem ist auf die Instrumentierung und Steuerung der Experimentestrahlerrohre vorbereitet, ohne allerdings spezielle Aufgaben und Anforderungen eines Experimentes abdecken zu können. Zu einem späteren Zeitpunkt ist es notwendig, eine genaue Schnittstellenabsprache zu treffen, welche den Aufgabenbereich des Kontrollsystems gegenüber den Experimenten absteckt.

## 12.5 Vorgesehene Netzwerk-Topologie

### 12.5.1 Geographische Randbedingungen

Das Design des ROSY-Ringes und der Umfang der Anlage von etwa 120 Metern machen den Einsatz bewährter und standardisierter LAN-Technologie (Ethernet) möglich. Obwohl Ethernet kein deterministisches Kommunikationsmedium darstellt, kann eine gute Annäherung an dieses Verhalten dann erreicht werden, wenn die Dimensionierung des Netzwerkes so erfolgt, daß die Belastung einzelner Zweige auf einen kleinen Prozentsatz der maximalen Bandbreite begrenzt wird. Um sowohl alle Komponenten des Beschleunigers als auch die Instrumentierungen der einzelnen Experimentestrahlerrohre geographisch günstig zu erreichen, wird die Topologie des Netzwerkes sich im

wesentlichen an der Lage des ROSY-Magnetringes und der entsprechenden Verbindungswege orientieren. Dieser Ansatz ist erfolgreich erprobt und zeigt gute Ergebnisse (z.B. ESRF/Grenoble).

### 12.5.2 Ethernet-Realisierung

Die benötigte Bandbreite der Datenkommunikation im Kontrollsystem wird deutlich über das mit einem einzelnen Ethernet-Zweig erreichbare Maß hinausgehen. Aus diesem Grund - und auch, um Redundanz und gute Ausfallsicherheit des Netzwerksystems zu erreichen - wird ein System voneinander unabhängiger, parallel verlegter Ethernet-Stränge (der Backbone) aufgebaut. Als physikalisches Medium wird Glasfaserkabel verwendet. Durch die Verwendung mehrpaariger Kabel wird eine optimale Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten bei gleichzeitiger Reduktion der Verkabelungskosten möglich.

Die einzelnen Stränge des Backbones werden durch Rechner mit Router-Funktion (das können z.B. die Kontrollrechner sein) oder dedizierte Router verbunden. Durch diesen Ansatz kann der Datenfluß dynamisch gesteuert werden. Damit sollten eventuell auftretende Kommunikationsengpässe durch einfache Umkonfiguration beseitigt werden können. Die Hinzunahme neuer Stränge zum Backbone ist ebenfalls einfach möglich. In der geplanten Ausbaustufe soll ein Backbone mit mindestens vier Ethernet-Strängen gelegt werden. Die einzelnen Stränge können dann für spezielle Bereiche eingesetzt werden (außer für die lokalen Netze der Experimentatoren an den User-Beamlines), wobei die ausgenutzte Bandbreite jeweils vergleichbar ist. Die Netzwerktopologie ist in Abb. 12.3 gezeigt.

- Ein Strang für die Konsol- und Präsentations-Ebene. Hier werden die Arbeitskonsolen für die grafische Benutzeroberfläche und andere high-level Applikationen eingebunden.
- Drei Stränge sind für die Netzwerkschicht zwischen Kontroll- und Prozeß-Ebene vorgesehen. Damit werden die Bereiche festgelegt:
  1. "Langsame Geräte" mit geringem Datenaufkommen und kleiner Bandbreitenanforderung, sowie User-Beamlines. Ca. 60 Prozent aller Transaktionen im Kontrollsystem beziehen sich auf diesen Bereich.
  2. Geräte mit mittlerem Datenaufkommen und moderaten Anforderungen an die Bandbreite (z.B. rampfähige Power Converter, Korrekturmagnete u.a.). Ca. 30 Prozent aller Transaktionen finden in diesem Bereich statt.
  3. Subsysteme zur Strahldiagnose (BPM-System, bildverarbeitende Systeme) mit hohem Datenaufkommen und hoher Bandbreite. Eine Transaktion findet in diesem Bereich nur aufgrund einer expliziten Anfrage statt. Eine hohe Bandbreite wird in der Regel als "Burst" angefragt, und sehr selten von mehreren Systemen gleichzeitig verlangt.

Einzelne Subsysteme innerhalb eines Bereiches können bei Bedarf durch Bridges voneinander separiert werden (z.B. die einzelnen User-Beamlines).

Durch die geographisch bedingte Topologie des Netzes, die Verwendung von Glasfasern im mehrpaarigen Kabeln und die redundante Auslegung im Backbone kann ein einfacher Übergang zu FDDI erreicht werden, ohne daß eine nennenswerte Neuverkabelung anfällt.

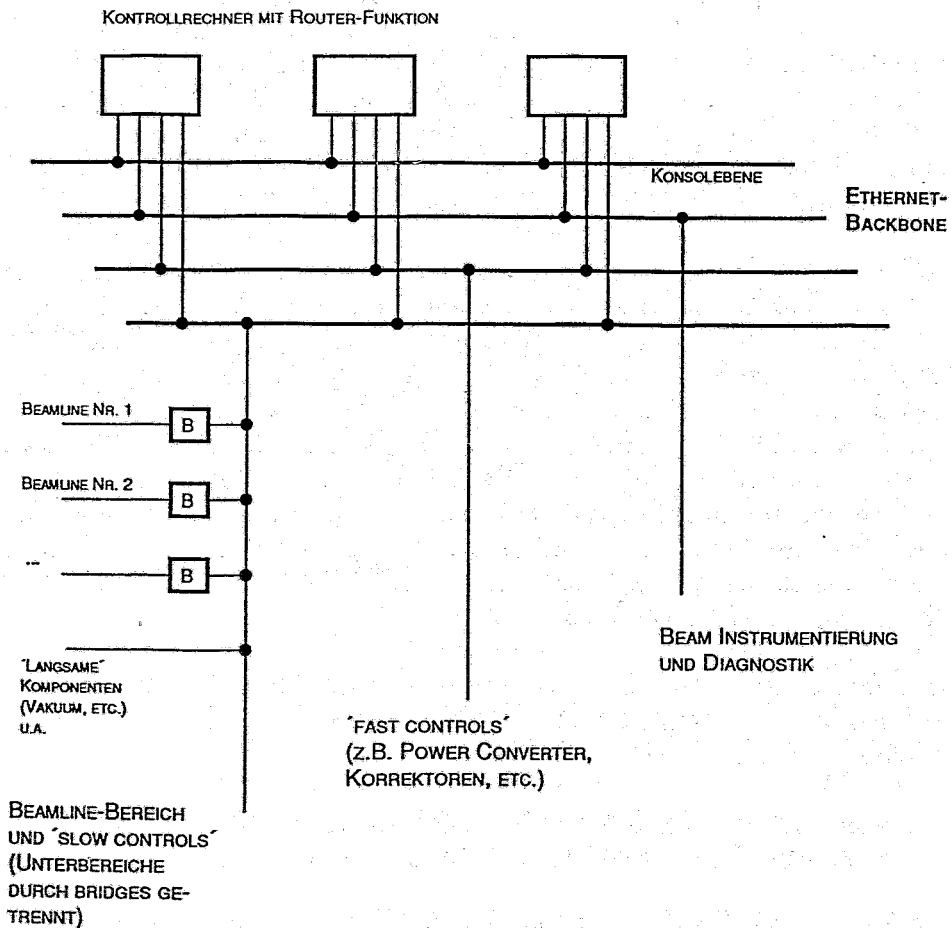


Abbildung 12.3: Netzwerk-Topologie des ROSY-Kontrollsystems

## 12.6 Kommunikationsmechanismen im Kontrollsystem

Das ROSY-Kontrollsystem arbeitet mit einer Menge kooperierender und kommunizierender Prozesse, welche über die verschiedenen Ebenen der Kontrollsystem-Architektur verteilt sind. Die Leistungsfähigkeit eines so verteilten Systems ist durch die gewählte Kommunikationsarchitektur und die verwendeten Kommunikationsmechanismen (Interprozeß-Kommunikation und

vor allem Remote-Interprozeß-Kommunikation) in maßgeblicher Weise bestimmt.

### **12.6.1 Synchrone und asynchrone Kommunikationsmechanismen**

Typischerweise sind in einem Beschleuniger-Kontrollsystem zwei charakteristische Kommunikationsanforderungen abzudecken. Diese Anforderungen werden durch die Art und die Häufigkeit der zu übertragenden Daten bestimmt.

Kurze Datenpakete (z.B. weniger als 50 Byte) werden sehr häufig im Fall einer quasianalogen Vorgabe eines Sollwertes an ein Gerät durch das Man-Machine-Interface (MMI) abgesetzt, oder fallen bei der Übertragung skalarer Istwerte zur Online-Datenbank der Kontrollebene an.

Die Forderung nach quasi-analoger Kontrollmöglichkeit schreibt hier für den ersten Fall ein Durchsatzverhalten von mehr als 20 Datenpaketen pro Sekunde vor, die über alle Ebenen der Kontrollarchitektur durchgereicht werden (Benutzerebene bis Feldbussystem). Ein solcher Datenverkehr wird im ROSY-System über einen asynchronen Kommunikationsmechanismus, der auf dem Austausch definierter Meldungen ("Messages") beruht, abgedeckt. Der Overhead, der sonst bei RPC-basierter Kommunikation - was den Verbindungsaufbau, -abbau sowie die -verwaltung betrifft - auftreten würde, kann dabei weitgehend vermieden werden, so daß die Kommunikationsperiode annähernd vollständig für die Übertragung der reinen Nutzdaten zur Verfügung steht.

Im Fall der Verarbeitung von umfangreicheren Meßdaten (z.B. aus der Strahl-diagnose, dem Strahlagekorrektursystem o.a.) sind typischerweise große Datenmengen (z.B. mehr als 100 kByte bei Versendung von Rohdaten der BPMS oder der bildgebenden Systeme) in vergleichsweise niedriger Häufigkeit zu übertragen. Für diesen Datenverkehr bietet sich ein synchroner RPC-Kommunikationsmechanismus an. Ein synchroner RPC-Aufruf besitzt einen Overhead für den Aufbau, Abbau und die Verwaltung der Kommunikation. Im Fall eines Austauschs großer Datenmengen fallen diese Zeiten im Vergleich zur Übertragungszeit der Nutzdaten aber nicht sonderlich ins Gewicht.

Das ROSY-Kontrollsystem stellt beide Kommunikationsarten bereit und kann damit gut an Art und Umfang der anfallenden Datenmengen angepaßt werden.

### **12.6.2 Horizontale und vertikale Kommunikationsrichtungen**

Das Kontrollsystem unterscheidet gemäß seiner angelegten Architektur zwei hauptsächliche Kommunikationsrichtungen. Die vertikale Kommunikationsrichtung umfaßt alle Ebenen der Kontrollsystemarchitektur und arbeitet ebeneübergreifend. Die horizontale Richtung ist immer auf eine Ebene beschränkt. Über den angebotenen horizontalen Kommunikationsmechanismus tauschen die Rechner innerhalb einer Ebene Meldungen und Daten aus. Der

horizontale Kommunikationsmechanismus ist ausschließlich in der Kontroll- und Prozeßebene ausgebildet.

Die horizontale Kommunikation in der Kontrollebene bindet die lokalen Online-Datenbanken der Kontrollrechner transparent zu einer verteilten Online-Datenbank zusammen. Durch die horizontale Kommunikation wird sichergestellt, daß zu jeder Zeit durch jeden Kontrollrechner jeder Maschinenparameter zugriffsfähig ist. Die horizontale Kommunikation in der Prozeßebene ermöglicht den prozessorübergreifenden Austausch von Daten. Mehrere räumlich weit verteilte Prozessoren der Prozeßebene können somit logisch zu einer Applikation zusammengeschlossen werden (z.B. schnelle globale Feedbacks, schnelle Strahlagekorrektur, Regelungen).

Die vertikale Kommunikation verbindet alle Ebenen des Kontrollsystems miteinander. Auf der Seite des Prozeßsystems übernimmt der sog. Prozeß-Manager die Hauptarbeit der anfallenden Datenkommunikation und Verteilung von und zum Prozeßsystem. Für jeden Prozeß-Manager des Prozeß-Systems gibt es eine Partner-Kommunikationsinstanz in der Kontrollebene (Concurrent Server). Ein Protokoll regelt den Datenfluß im Detail.

Zwischen Benutzer- und Kontrollebene werden im Bedarfsfall ebenfalls Kommunikationsprozesse aktiviert. Gemäß der Anzahl der laufenden Applikationen variiert die Anzahl der Kommunikationsprozesse ständig.

## 12.7 Beschreibung der Software-Struktur

### 12.7.1 Die Resource-Datenbank

Die Resource-Datenbank enthält alle während des Betriebs notwendigen quasistatischen Strukturinformationen des Kontrollsystems. Sie ist im laufenden Betrieb über die Rechner der Kontrollebene verteilt (Replikation). Die volle Replikation der Resource-Datenbank erlaubt die simultane Verarbeitung von Lese- und Schreiboperationen. Die Konsistenz der Datenbestände wird durch Verwendung der horizontalen Kommunikationswege sichergestellt. Ein eigenes Protokoll sorgt für die notwendige Verteilung der Daten. Breitbandige Zugriffsmöglichkeiten auf die Resource-Datenbank ergeben sich durch die Implementierung in einem Shared-Memory Segment (typische Größe: ca. 1 Megabyte) der Kontrollrechner. Ein solcher Ansatz minimiert die erforderliche Netzwerkbandbreite zwischen den Rechnern der Kontrollebene, da keine zentrale Instanz (z.B. Server) nachgefragt werden muß.

Über die Resource-Datenbank wird die dynamische Kopplung des Prozeßsystems an die Kontrollebene vorgenommen. Die Kopplung zwischen Prozeß- und Kontrollebene wird erst zur Laufzeit des Kontrollsystems durchgeführt. Dabei wird von der eindeutigen Namensdefinition für Geräte- und Parameternamen Gebrauch gemacht. Das Kontrollsystem enthält keine "harte

Verdrahtung" bezüglich der Unterstützung von Maschinenparametern im Prozeßsystem. Diese Einrichtung bietet maximale Flexibilität in der Umkonfigurierung des Prozeßsystems.

### 12.7.2 Verwaltung von Objektnamen und Parameterklassifizierung

Die Resource-Datenbank übernimmt u.a. die Verwaltung der Objektnamen im Kontrollsystem.

Ein verteiltes Beschleuniger-Betriebssystem verwaltet eine große Anzahl von Objekten, die durch die Benutzer angesprochen werden. Jedes Objekt hat dabei einen Namen und eine Lokalität zugeordnet. Es wird ein Mechanismus zur Benennung aller Objekte geschaffen, so daß über benutzerfreundliche Namen auf sie zugegriffen werden kann. Die Verwaltung dieser Namen sorgt für die Abbildung in interne Identifizierer, in deren Standort und eine mögliche Erreichbarkeit. Die Übersetzung eines Namens in diese Informationen geschehen für Benutzer des Kontrollsystems automatisch. Die Verwaltung von Objektnamen erfüllt damit die folgenden notwendigen Eigenschaften:

- Transparenz der Namen: Namen sagen nichts über die Lokalisation des Objektes aus
- Transparenz des Ortes: Der Name des Objektes muß nicht verändert werden im Fall einer Veränderung des Objektortes
- Transparenz in der Verteilung der Objekte und der dazu notwendigen Verwaltungsinformationen
- Die Möglichkeit zur dynamischen Adaptierung an veränderte Objekteigenschaften (z.B. Lokalisierung)
- Leistungsfähigkeit (z.B. Zugriffsgeschwindigkeit)

Die Replikation der Resource-Datenbank ist eine direkte Folge der Forderung nach dynamischer Adaptierbarkeit des Kontrollsystems. Die Replikation ist gerechtfertigt, da aller Erfahrung nach in einem Kontrollsystem die Abfrage von Informationen der Resource-Datenbank sehr viel häufiger stattfindet als eine Veränderung der Gesamtstruktur.

Die konkreten Bestandteile der Resource-Datenbank im ROSY-System sind:

- Eindeutige Liste aller Geräte im Kontrollsystem
- Eindeutige Liste aller Parameter im Kontrollsystem
- Eindeutige Namensgebung und Verwaltung von Objektnamen des Kontrollsystems (insbesondere Geräte- und Parameternamen). Eine Namenskonvention regelt die konkrete Zusammenstellung eines Namens.
- Übersetzungsfunktionen (Mapping) von Geräte- und Parameternamen in interne eindeutige Identifikationsnummern
- Netzwerkkarte aller Rechner im Kontrollsystem (Möglichkeit des Routing)
- Routingkarten zu allen Geräteparametern (Adressierung von Parametern)
- Mögliche Kommunikationsarten zum Prozeßsystem (asynchrone/synchrone Kommunikationsmechanismen)

- Dynamische Bindungsinformationen zum Prozeßsystem (Anzahl, Lokation, Verfügbarkeit, Aufgabenbereiche, Verbindungswege (Routing) von Prozeßmanagern und daran angekoppelter Applikationen des Prozeßsystems)

Für eine detaillierte Darstellung der Notwendigkeiten einer eindeutigen Namensgebung und davon abgeleiteter Informationen kann [Go 91], Kapitel 7, herangezogen werden.

Ein durch das ROSY-Kontrollsystem verwalteter Parameter besitzt einen eindeutigen Objektnamen (s.o.), der gemäß der verbindlich vorgeschriebenen Namenskonvention gebildet wird. Jeder Parameter zeichnet sich darüber hinaus durch einen TYP und eine INTERPRETATION aus:

Typ des Parameters:

- "A" - Analoger Wert (Basistyp: 32-Bit Float-Zahl)
- "D" - Digitaler Wert (Basistyp: 32-Bit Integer-Zahl mit Vorzeichen)
- "S" - String-Daten mit 0-Terminierung (Basistyp: Character)
- "B" - Beliebige Byte-Daten (Basistyp: Byte)

Interpretation des Parameters:

- "M" - "Measured" data. Gemessene Werte, also Istwerte
- "C" - "Controlled" data. Gesteuerte Werte, also Sollwerte.
- "D" - "pure Data". Reine Daten ohne Interpretation.

Der Typ und die Interpretation werden unter Verwendung der oben aufgeführten Buchstaben als Doppelzeichen zusammengefaßt und an den Parameternamen angehängt. Ein Beispiel für einen gültigen Parameter-Namen für den Soll-Strom der ROSY-Dipole ist:

ROS\_MAINMAG\_DIPOL.STROM\_AC

### 12.7.3 Die verteilte Online-Datenbank

Die Online-Datenbank des ROSY-Kontrollsystems verwaltet die Steuer- und Meßdaten des gesamten Beschleunigerkomplexes. Sie entkoppelt die Konsolenebene und die dort ablaufenden High-Level-Applikationen vom Prozeßsystem und ist speziell auf eine hohe Transaktionsbandbreite hin optimiert. Durch die autonome Istwernerfassung des Prozeßsystems kann die Online-Datenbank als Spiegelbild des aktuellen Maschinenzustandes aufgefaßt werden. Ein Satz von optimierten Routinen ermöglicht den gleichzeitigen und synchronisierten Zugriff auf ausgewählte Beschleunigerparameter, unabhängig von dem Rechner, der die betreffende Applikation betreibt. Die Datenrepräsentation in der Online-Datenbank ist speziell für heterogene Rechnersysteme unterschiedlicher Architekturen ausgelegt.



Die Verwaltung der Daten in der Online-Datenbank setzt voraus, daß eine logische Strukturierung der zu steuernden Komponenten vorgenommen wird. Da alle Steuerungen bzw. Meßwerterfassungen letztlich durch Hardwarekomponenten (z.B. Netzgeräte, Pumpen, Klystrons, etc.) realisiert sind, bietet sich eine logische Gliederung in die zu steuernden Geräte an. Jedes Gerät (z.B. ein Netzgerät) besitzt eine Reihe von Parametern, die Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie Statusinformationen des Gerätes darstellen. In diesem Sinne wäre z.B. der (steuerbare) Ausgangsstrom eines Netzgerätes ein Parameter. Die logische Strukturierung der gesamten Beschleunigeranlage in Geräte und Parameter ist die Grundlage der Kontrolle durch das Rechnersystem. Die Online-Datenbank des Kontrollsystems verwendet dazu spezielle Datenstrukturen. Die Einträge in der Online-Datenbank des ROSY-Kontrollsystems erfolgen logisch strukturiert nach "Device Records". Ein "Device Record" ist hier eine Datenstruktur, die ein einzelnes Gerät des Beschleunigers vollständig beschreibt. Dazu gehören allgemeine Informationen (Name, Art,...) sowie alle "Parameter Records" des Gerätes. Ein "Parameter Record" seinerseits ist wieder eine Datenstruktur zur Beschreibung aller wichtigen Daten eines realen Beschleuniger-Parameters (z.B. Magnetstrom). Er enthält einen Deskriptor zur Speicherung von allgemeinen Informationen (Skalierung, Alarmgrenzen, ...) und ein Feld zur Speicherung der aktuellen Parameter-Werte (z.B. Stromwerte in Ampere).

Die Menge aller Geräte mit zugeordneten Parametern wird in der Definitionsphase separiert in Teilmengen, die auf verschiedenen Rechnern der Kontrollebene verwaltet werden sollen. Jeder Rechner der Kontrollebene bearbeitet eine solche Teilmenge in seiner lokalen Online-Datenbank. Die Gesamtheit der verschiedenen Teildatenbanken wird innerhalb der Kontrollebene durch horizontale Kommunikationswege und ein spezielles Protokoll so verbunden, daß eine einzige Online-Datenbank sichtbar wird. Die Online-Datenbank des ROSY-Kontrollsystems kann in der zur Zeit geplanten Version ca. 65000 Geräte mit jeweils maximal 255 Parametern verwalten.

#### 12.7.4 Regelmaschinen

Jeder der Kontrollrechner betreibt eine 'Regelmaschine' (ein Satz kooperierender Prozesse, die mit gemeldeten Parameteränderungen bzw. Werten aus der Online-Datenbank gespeist werden), die abstrakte Regeln - ausgehend von den gemeldeten Eingangsdaten - abarbeitet und Kontrollsystemparameter verknüpft. Eine Teilmenge der Regeln beschäftigt sich mit algorithmischen Abbildungen von hardwarebasierten Parametern (z.B. Magnetströmen) in maschinenphysikalisch aussagekräftige Größen (z.B. Arbeitspunkte). Eine andere Teilmenge definiert heuristische 'Rezepte' zur robusten Steuerung einzelner Subsysteme (z.B. Injektionssystem). Regeln können während des Betriebs aktiviert oder deaktiviert werden.

Durch die Zusammenfassung oder Kopplung mehrerer Parameter auch unterschiedlicher Typen können komplexe, mehrparametrische Steuerungen realisiert werden. Darüber hinaus kann durch die Definition von einfachen

'Entscheidungsregeln' (z.B. Bildung von Summenstörungen oder Qualitätszahlen) eine einfache und effiziente Überwachung einzelner Teilbereiche gewährleistet werden.

### 12.7.5 Backbone-Datenbanken

Die Backbone-Datenbank (bzw. -Datenbanken) enthält alle notwendigen Daten für die komplette Beschreibung der Beschleunigeranlagen. Sie hat eine spezielle Bedeutung für die Konfiguration des Kontrollsystems.

Die Backbone-Datenbank basiert auf einem kommerziell erhältlichen, netzwerkfähigen, relationalen Datenbanksystem (RDBS). Das RDBS muß die Standardabfragesprache SQL unterstützen und die Möglichkeit bieten, embedded-SQL Aufrufe in Applikationsprogrammen zu verwenden. Da die Backbone-Datenbank im wesentlichen Verwaltungsdaten bereithält und für das einmal gestartete bzw. laufende Kontrollsystem nur in zeitunkritischen Situationen benötigt wird, werden keine besonderen Anforderungen an die Durchsatzleistung gestellt. Die Auswahl eines Datenbanksystems unterliegt deswegen keiner besonderen Einschränkung und kann sich daher an den kommerziell verfügbaren Produkten orientieren, die bereits bei anderen Beschleunigeranlagen mit Erfolg eingesetzt werden (z.B. Ingres, Oracle o.a.).

Die im RDBS gespeicherten Daten umfassen typischerweise:

- Konfigurationsinformationen für Rechner des Kontrollsystems
- Geräte- und Parameterlisten des Kontrollsystems als Abbild der Hardware in einer standardisierten Datenstruktur
- Beschleunigeroptische Beschreibung der Beschleunigeranlage zur Verwendung in Simulationsprogrammen (z.B. MAD)
- Verkabelungs- und Belegungspläne
- Geräteeinschaltzustände als Default- oder Standby-Werte
- Netzwerk-Knotenplan
- Hilfstexte für Fehlererkennung und Fehlerbehebung
- Optische Eigenschaften der Magnete, Magnetfelddaten, Eichmessungen
- Alarmdaten allgemein und Alarmdaten von Geräten
- Parametersätze von Maschinenzuständen
- Meßdaten der Strahldiagnose (z.B. Strahlagekorrektur)
- Eichdaten von Strahldiagnoseelementen (z.B. Strahlage monitore)
- Trendverwaltung und Datenlogbuch
- andere Verwaltungsdaten

Diese Liste ist sicherlich unvollständig und muß im konkreten Fall ergänzt oder abgeändert werden.

Die besondere Bedeutung der Backbone-Datenbank für das Kontrollsystem liegt in der Generierung der Online-Datenbank und der Resource-Datenbank aus den Daten der Backbone-Datenbank. Eine Menge von Software-Werkzeugen wird diesen Vorgang automatisch übernehmen. Dieser Ansatz automati-

siert den Aufbau der notwendigen Laufzeit-Datenstrukturen des Kontrollsystems, ohne Details von Geräteeigenschaften zu kennen. Er sorgt dafür, daß zu jeder Zeit eine wohldefiniert abgestimmte Koexistenz von verteilten Elementen der Datenbanken sichergestellt ist und die aktuellsten Definitionen an die Prozeßmanager und Applikationen auf der betreffenden Hardwareebene (auf Anfrage hin) übermittelt werden können.

### 12.7.6 Applikations-Interface

Der Begriff Applikation wird sehr allgemein auf allen Ebenen der Kontrollsystem-Architektur verwendet. Damit kann ein einziger Prozeß (Task) oder eine Gruppe von Prozessen (Tasks) gemeint sein; wichtig für die Benennung ist die logische Funktion, die durch eine Applikation ausgeführt wird.

#### - Konsol- und Kontrollebene

Applikationen in der Konsol- und Kontrollebene binden sich über einen Standardaufruf aus einer verbundenen Programmbibliothek an das Kontrollsystem an. Die Verbindung der Benutzerebene zur Kontrollebene wird dabei transparent überbrückt. Nach der Ankopplung einer Applikation an das Kontrollsystem kann auf jeden Maschinenparameter über wenige Standardaufrufe zugegriffen werden, was die Entwicklung einer Applikation - soweit Zugriff auf das Kontrollsystem genommen wird - sehr einfach und programmierfreundlich macht.

Die Struktur des Applikations-Interface für den Programmierer erlaubt den transparenten Zugriff auf jeden im Kontrollsystem gespeicherten Beschleunigerparameter. Ein Parameter kann dabei durch seinen Namen oder seine eindeutige Kennung angesprochen werden. Eine Übersetzung von Namen in Kennungen und umgekehrt ist Aufgabe der Resource-Datenbank. Jeder Parameter-Zugriff kann wahlweise synchron oder asynchron erfolgen. Der asynchrone Ansatz wird durch spezielle Merkmale der Online-Datenbank zusätzlich unterstützt.

Die Schnittstelle zur Online-Datenbank ermöglicht es Applikationen, verzugslos auf Änderungen von Parameterwerten reagieren zu können. Zu diesem Zweck können sich Applikationen bei der Datenbank explizit "anmelden" und ihr "Interesse" für eine ausgewählte Gruppe von Parametern bekanntgeben. Ändert sich ein solcher Parameter, so wird die Applikation unterbrochen und es wird eine Interrupt-Routine aufgerufen, die der Programmierer der Applikation selbst zur Verfügung stellen muß. Eine Applikation kann jederzeit die Benachrichtigung stoppen oder wieder aufnehmen. Falls keine Benachrichtigung mehr gewünscht wird, kann sich die Applikation wieder "abmelden". Eine Benachrichtigung erfolgt genau dann, wenn auf einen (angemeldeten) Parameter ein Schreibzugriff erfolgte, auch wenn dieser keine Werteänderung beinhaltete. Damit läßt sich auch die Häufigkeit von Zugriffen auf Parameter überwachen. Eine Applikation kann jederzeit die Benachrichtigung für die angemeldete Gruppe von Parametern stoppen oder wieder aufnehmen. Auch

das Abmelden einer Teilmenge von Parametern und das Neu-Anmelden einer anderen Parametergruppe ist möglich.

Alle Funktionen des Applikations-Interfaces sind für den gleichzeitigen Zugriff auf die Maschinenparameter, ausgehend von mehreren Rechnern, ausgelegt. Die Verbindung einzelner Parameter zu einzelnen Kontrollrechnern oder Komponenten des Prozeßsystems ist nicht explizit sichtbar.

#### - *Prozeßebene*

Für Applikationen in der Prozeßebene existiert zur Anbindung an das Kontrollsystem ebenfalls ein Standardaufruf. Dabei wird die Kontrollebene über die Existenz einer neuen Applikation in der Prozeßebene unterrichtet. Nach einer erfolgreichen Anmeldung wird der Betrieb der Applikation autorisiert. Eine Menge von Standardaufrufen steht einer Applikation dann für die Manipulation von Maschinen-Parametern zur Verfügung.

### **12.7.7 Wahl des Betriebssystems der Prozeßebene**

Die Prozeßebene koexistiert weitgehend eigenständig und autonom mit der Kontrollebene. Beide Ebenen sind über definierte Kommunikationsschnittstellen lose miteinander gekoppelt. Es findet eine Lastverteilung und Schwerpunktbildung auf beiden Ebenen gemäß ihren speziellen Fähigkeiten und den gestellten Anforderungen statt.

Das Betriebssystem der Prozeßebene muß aus der Sicht der Kontrollebene optimale Kommunikationsmechanismen (Bandbreite, Bedienung) zur Kopplung beider Ebenen bereitstellen. Weiter erfordern die speziellen Aufgaben der Prozeßebene ein echtzeitfähiges Betriebssystem. Von der Wahl des Echtzeitbetriebssystems hängt die Gesamtleistungsfähigkeit der Prozeßebene entscheidend ab. Die Handhabbarkeit und das Antwortverhalten des Gesamtkontrollsystems ist in besonderer Weise von den Kommunikationseigenschaften des Echtzeitbetriebssystems bestimmt.

Das Echtzeitbetriebssystem wird unter Berücksichtigung folgender globaler Kriterien ausgesucht:

- Entwicklungsumgebung
- Benutzerfreundlichkeit
- Gesamtleistungsfähigkeit
- Netzwerkintegration
- Multiprozessing
- Real-Zeit Eigenschaften des Echtzeitkerns
- Herstellerunabhängigkeit bzgl. Target-Architekturen

Der Echtzeitkern des Systems findet eine Bewertung gemäß den aufgelisteten Eigenschaften:

- Multitasking
- Preemptives Scheduling mit Prioritätssteuerung
- Intertask-Kommunikation
- Intertask-Synchronisation
- Kommunikation zwischen Prozessen und angebundener Interrupt-Task
- Lastunabhängigkeit
- Deterministisches Verhalten (Interrupt-Latenzzeiten u.a.)
- Kompaktheit
- I/O-Durchsatz
- ROM-Fähigkeit

Für ROSY soll auf allen VME-Rechnern der Prozeßebene das Echtzeitbetriebssystem VxWorks der Wind River Systems Inc. (siehe dazu z.B. [VxKer]) eingesetzt werden, da es aus heutiger Sicht die oben genannten Punkte unserer Meinung nach am besten erfüllt. VxWorks hat ein hierarchisches Design. Der Echtzeitkern ist klein und enthält nur die elementarsten Funktionen. Er erfüllt alle geforderten Eigenschaften.

### 12.7.8 Prozeßgerüst und Taskmenge im Prozeßsystem

Das Kontrollsystem verteilt seine Prozesse örtlich und logisch in der Startphase sowie im laufenden Betrieb über die Rechner der Kontroll- und Prozeßebene. Wichtigste Software-Instanz für die Anbindung eines Rechners des Prozeßsystems an die Kontrollebene ist der Prozeß-Manager. Er koordiniert den gesamten Datenverkehr eines Rechners der Prozeßebene mit der Kontrollebene. Er empfängt Sollwertvorgaben, die er an zuständige Applikationen weiterleitet und übermittelt gemessene Istwerte im Falle einer Werteänderung an die Kontrollebene. Alle Applikationen (Tasks) müssen sich vor dem Start ihrer Tätigkeit beim Prozeß-Manager anmelden. Der Prozeß-Manager erteilt ihnen dann die Startautorisierung. Er unterrichtet die Kontrollebene über den Start der Applikation.

Das Kontrollsystem legt für einen Rechner des Prozeßsystems eine Mindestmenge von aktiven Prozessen fest. Neben dem beschriebenen, asynchron arbeitenden Prozeßmanager existiert ein zweiter Manager für die synchrone Kommunikation. Ein Log-Manager ist für Meldungen und die Alarmverarbeitung verantwortlich. Applikationen gruppieren sich nach Bedarf um dieses Grundgerüst.

Es wird ein Applikationsrahmen für alle Anwendungen im Bereich des Prozeßsystems erstellt, so daß auch Nichtspezialisten in der Lage sind, Applikationen im Prozeßsystem zu entwickeln. Die Kommunikation zwischen Applikation und im Prozeßsystem zu entwickeln. Die Kommunikation zwischen Applikation und der übergeordneten Kontrollebene wird in diesem Applikationsrahmen enthalten sein und kein Problem des Anwendungsprogrammierers mehr sein.

### **12.7.9 Prozeß-Datenbank und Kanaladressierung**

Die VME-Komponenten der Prozeß-Ebene stellen die Verbindung zu der Hardware des Beschleunigerkomplexes her. Dies geschieht durch Einsatz eines dedizierten, untergeordneten Feldbussystems oder - falls hohe Datenbandbreite gefordert wird - durch direkten Anschluß der entsprechenden Komponenten an I/O-Module (z.B. Transientenrecorder hoher Speichertiefe). Um eine Entkopplung des Prozeß-Managers von den Tasks zu erreichen, die die eigentlichen I/O-Aufgaben wahrnehmen, und um eine Zwischenspeicherung von Daten und Verwaltungsinformationen zu ermöglichen, wird die Prozeßdatenbank verwendet. Sie besteht aus Datenstrukturen im Shared Memory der entsprechenden VME-CPU und ist auf hohen Datendurchsatz optimiert. Durch Verwendung von speziellen Semaphoren kann ein gleichzeitiger Zugriff verschiedener I/O-Tasks und des Prozeß-Managers ohne nennenswerten Performance-Verlust synchronisiert werden. Die Datenstrukturen der Prozeßdatenbank sind dynamisch und in ihrer Größe nur durch den verfügbaren Speicher begrenzt, optimierte Zugriffsroutinen gestatten die schnellstmögliche Bearbeitung von Werten. Auf der Ebene der Prozeßdatenbank ist das elementare Objekt der 'Parameter' mit uninterpretierten Werten (d.h. Integer-Darstellung). Die logische Zusammenfassung zu 'Geräten' und die Dateninterpretation bleiben Aufgabe der Online-Datenbank in der Kontrollebene.

Die Prozeßdatenbank enthält neben den Parameterdaten auch Verwaltungsinformationen und Angaben über die Kanalzuordnung einzelner Parameter. Durch diese Kanalzuordnung kann für jedes Datum eindeutig ein entsprechender I/O-Kanal (VME oder Feldbus) selektiert werden. Dabei wird der Transport zu Komponenten des Feldbussystems oder einzelner VME-Module nicht explizit sichtbar. Die Kanalzuordnung ist in der Resource-Datenbank des Kontrollsystems definiert und wird beim Starten des Prozeßsystems automatisch geladen.

### **12.7.10 I/O-Manager und I/O-Tasks**

Geräteschnittstellen werden über eine schichtförmige Software auf der Basis eines VxWorks-Gerätetreibers angesprochen. Die einzelnen Schichten erlauben einen unterschiedlichen Zugriffsgrad auf die Schnittstelle (und damit das Gerät) unter ausschließlicher Benutzung der Aufrufe darunterliegender Ebenen. Je höher die Zugriffsebene, desto weiter ist eine Abstraktion der Hardware und damit ein standardisierter und vor allem synchronisierter Zugriff möglich.

Auf der Basis dieser Schicht-Software existiert eine Bibliothek von Anwender-routinen für das Prozeßsystem, welche von I/O-Tasks benutzt werden kann. Für die Erfassung von Istwerten wird es für jedes Gerät oder, falls es sich anbietet, für eine Gruppe von gleichartigen Geräten, eine eigene Menge Tasks geben. Diese Tasks messen die Istwerte autonom und legen die Daten in der lokalen Prozeßdatenbank ab. Sie benachrichtigen den Prozeß-Manager von einer Werteänderung dieses Istwert-Parameters. Der Prozeß-Manager übermit-

telt die Werteänderung an übergeordnete Schichten des Kontrollsystems. Andere Tasks aus der Taskmenge übernehmen und überwachen Sollwertvorgaben, die ihnen z.B. von der Kontrollebene über den Prozeßmanager übermittelt werden.

Für die Anbindung eines Feldbussystems ist ein eigener I/O- oder Feldbus-Manager vorgesehen. Ein solcher Manager setzt sich in der Regel aus mehreren Tasks zusammen. Er übernimmt die Vermittlung von Sollwertvorgaben an das Feldbussystem und koordiniert den Transport der Istwerte über die Prozeß-Datenbank und den Prozeß-Manager an die übergeordneten Schichten des Kontrollsystems. Der Feldbus-Manager führt auch eine Überwachung der Komponenten des Feldbussystems durch.

## 12.8 High-Level-Applikationen

High-Level Applikationen mit grafischer Benutzeroberfläche laufen auf der Konsolebene ab. Aus Gründen der Benutzer- und Bedienfreundlichkeit wird die Menge verschiedener Aufgaben in möglichst wenige Programme gekapselt, die dafür jeweils universeller verwendbar sind (Beispiel: Statt verschiedener Programme zur Datenanalyse des BPM-Systems wird eine Applikation entworfen, die einen "Werkzeugkasten" zur digitalen Signalverarbeitung etc. bereitstellt.). Diese Programme zeichnen sich durch eine standardisierte Oberfläche und Bedienung aus. Die Merkmale dieser Oberfläche werden durch einen sogenannten "ROSY Applications Style Guide" definiert und sind für alle Applikationen auf der Kontrollebene verbindlich. Dadurch wird der Einarbeitungsaufwand für den Operateur minimiert, die Bedienbarkeit und Ergonomie des Systems steigt.

Die folgenden Punkte geben einen Überblick über die wesentlichen High-Level-Applikationen des ROSY-Kontrollsystems.

### 12.8.1 Das grafische Man-Machine-Interface

Die Grundlage jegliches Mensch-Maschine-Interfaces (MMI) ist der Aufbau einer dem Benutzer bekannten Umgebung auf dem Computer, mit graphischen Objekten, die eine direkte Assoziation mit den zu steuernden Objekten auslösen. Die Kontrolle erfolgt durch Interaktionen mit den graphischen Objekten, sowohl passiv durch Beobachtung von Werten oder Zuständen, als aktiv durch Manipulationen der Objekte über die Eingabeeinheiten des Computers (Maus, Tastatur, etc.).

Die logische und auch topologische Struktur einer Beschleunigeranlage ist sehr komplex. Würde man für jede Komponente oder jede Komponentengruppe ein eigenes, unabhängiges MMI entwickeln wollen, wäre erstens die zu entrichtende Arbeit enorm und zweitens wäre das gesamte MMI durch die große

Vielfältigkeit für den Benutzer unüberschaubar. Das Resultat wäre eine lange Entwicklungs- und eine lange Anlernzeit. Die Lösung dieses Problems bietet sich in der sogenannten künstlichen Realität.

Künstliche Realität bedeutet, daß auf dem Computer mittels graphischer Darstellung eine Umgebung erzeugt wird, die der Wirklichkeit ähnlich ist. Die Ähnlichkeit bezieht sich jedoch nicht nur auf das Aussehen, wie im Falle von künstlich erzeugten dreidimensionalen Bildern, sondern auch auf Funktionalität, so daß virtuelle Schalter gedrückt oder virtuelle Knöpfe gedreht werden können. Die traditionelle computergesteuerte Kontrolle, die normalerweise mittels Menüs und Tastatureingaben verläuft und die Beziehung zum kontrollierten Objekt weitgehend entfremdet, wird somit durch simulierte manuelle Kontrolle der einzelnen Komponenten ersetzt. Der Bediener bekommt dadurch wieder das Gefühl, unmittelbar mit dem Gerät und nicht über ein komplexes und oft unverständliches Interface zu arbeiten. Diese Kombination graphischer Objekte, denen eine Funktion zugeordnet ist, nennt sich synoptische Repräsentation, oder kurz Synoptik.

Das hier vorgeschlagene MMI baut auf dem Design und der Entwicklung des MMI von ELETTRA ([Po 91], [Su 92], [Su 93]), einer Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation, die Ende des Jahres 1993 in Betrieb gehen wird. Das Konzept und auch die computertechnische Implementation des MMI von ELETTRA ist weitgehend unabhängig von ELETTRAS Struktur und von anderen Teilen des Kontrollsystems, so daß erhebliche Teile direkt für ROSY übernommen werden können.

Die Beschleunigeranlage besteht aus einigen tausend Komponenten, die einzeln oder in Gruppen anzusteuern sind. Alle diese Komponenten sind direkt vom MMI durch eine einzige Synoptik erreichbar. Die Synoptik besteht aus einer zweidimensionalen Abbildung der Anlage aus der Vogelperspektive (Abb. 12.4). Die zu kontrollierenden Komponenten werden durch ihre wirkliche Form und Farbe dargestellt. Um Zweideutigkeiten zu vermeiden, sollen deshalb die Farben der Komponenten so gewählt werden, daß verschiedene Gruppen nicht dieselbe Farbe haben.

Der Benutzer bewegt sich in der Synoptik mittels der Maus und der Mausknöpfe, ohne die Tastatur zu benutzen. Er kann den Maßstab beliebig verkleinern und so die Anlage und ihre Komponenten vergrößert sehen, was im Computerjargon als **Zoom-in** bezeichnet wird. In diesem Fall ist nur noch ein Teil der Anlage auf dem Schirm sichtbar. Wiederum mit der Maus bewegt der Benutzer das Fenster, durch das er die Anlage sieht, um so von einem Teil der Anlage zum anderen zu kommen. Diese Aktion nennt sich **Pan**. Beide Aktionen, Zoom und Pan, laufen stetig solange die entsprechende Mausknöpfe gedrückt gehalten werden und vermitteln somit den Eindruck, als ob sich der Benutzer wie ein Vogel über dem Beschleuniger bewegt.



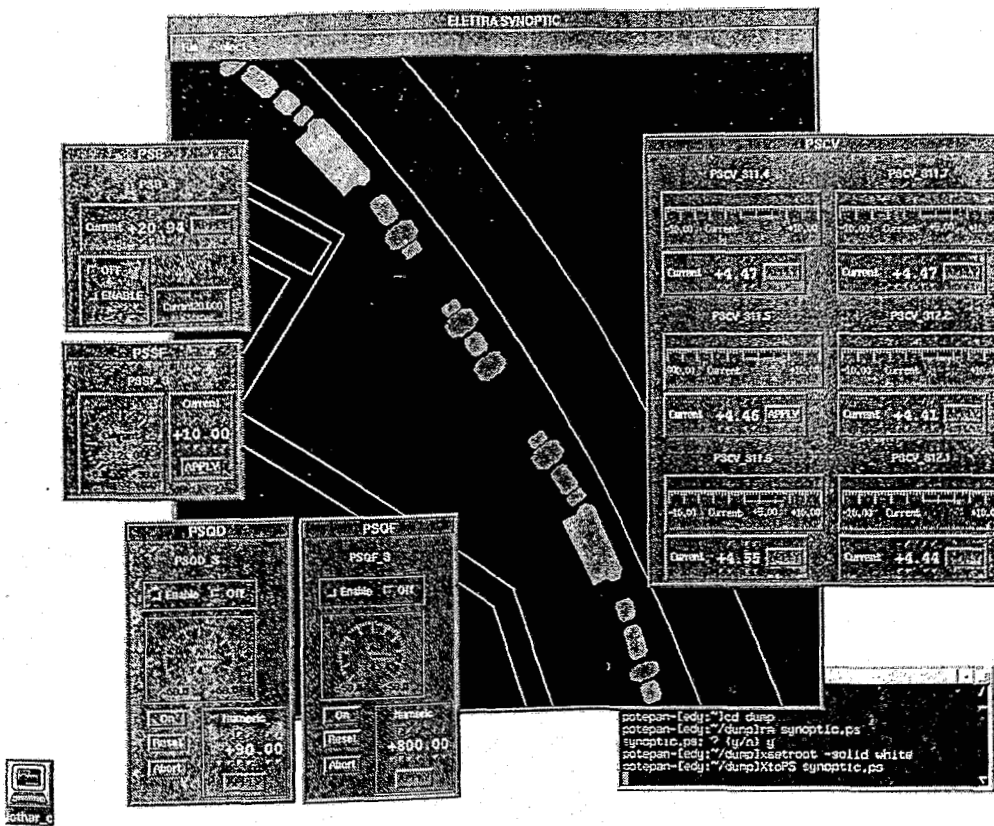


Abbildung 12.4: Die Synoptik des MMI von ELETTRA.

Die Objekte des MMI sind hierarchisch strukturiert. Jedes Objekt wird eindeutig durch einen Namen, der sich aus der Art des Objektes (Familie) und aus der Beziehung oder topologischer Lage des Objektes innerhalb der Artgruppe (Mitglied) zusammensetzt. Die eindeutige Namensgebung innerhalb des MMI verlangt eine Zuordnung von MMI Namen, zu Namen des ROSY-Kontrollsystems, die anhand der übergeordneter ROSY-Namenskonvention vergeben werden. Als mögliche Namensgebung steht z.B. die Familie QF für alle fokussierende Quadrupole, wobei QF\_S2.1 der volle Namen des ersten Quadrupoles im zweiten Achromat des Speicherringes ist. Das MMI unterstützt noch weitere Ebenen der Hierarchie. So sind die einzelnen Ebenen im obigen Beispiel wie folgt: die ganze Anlage - Speicherring - Magnete - Quadrupole - QF - QF\_S2.1. Der Speicherring wird außer in die Magnete noch in Vakuum, Instrumentation und Hochfrequenz untergeteilt. In jeder Ebene der Hierarchie können die einzelnen Gruppen unsichtbar gemacht werden um so die Synoptik überschaubar zu halten. Außerdem können alle Elemente einer Gruppe um einen ganzzahligen Faktor vergrößert dargestellt werden, um sie noch gut sehen zu können auch wenn das Fenster die ganze Anlage zeigt.

Ist die zu steuernde Komponente auf dem Bildschirm sichtbar, kann sie mit einfachem Anklicken angewählt werden. Ein Popup-Menü bietet alle Aktionen, die mit der Komponente, ihrer Familie, anderen Mitgliedern der Familie oder

eventuellen Subkomponenten verbunden sind, an. Eine Aktion kann ein einfaches Kontrollpaneel mit Lese- und Setzwerten oder eine komplexe Applikation sein. Unabhängige Aktionen können gleichzeitig auf dem Computerschirm aktiv sein, allerdings kann eine aktive Aktion nicht nochmals aufgerufen werden.

Einfache Kontrollpaneele werden interaktiv mit einem Kontrollpaneel-Editor (CPE) aufgebaut ohne eine einzige Programmzeile zu schreiben.

Der Editor führt den Benutzer intuitiv von der Auswahl einzelner Aktionen bis hin zum interaktiven Test des erzeugten Paneels (Abb. 12.5). Nachdem eine Komponente angewählt worden ist, bietet CPE alle Aktionen, die für die gegebene Komponente in Frage kommen, an. Typische Aktionen sind lese Status, lese Wert, setze Wert, setze ein/aus, usw. Es können auch mehrere Komponenten gleichzeitig der selben Aktion zugewiesen werden. Wenn die Aktion bestimmt ist, können die entsprechenden virtuellen Bedienelemente (Widgets) ausgesucht werden. Unter ihnen finden sich verschiedene Sorten Schalter, Drehknöpfe, Trimmer, digitale und analoge Anzeigen und ein Widget zur graphischen Vorstellung einer Meßserie oder eines Trends. Jedoch können nur die Widgets benützt werden, die der jeweiligen Aktion entsprechen.

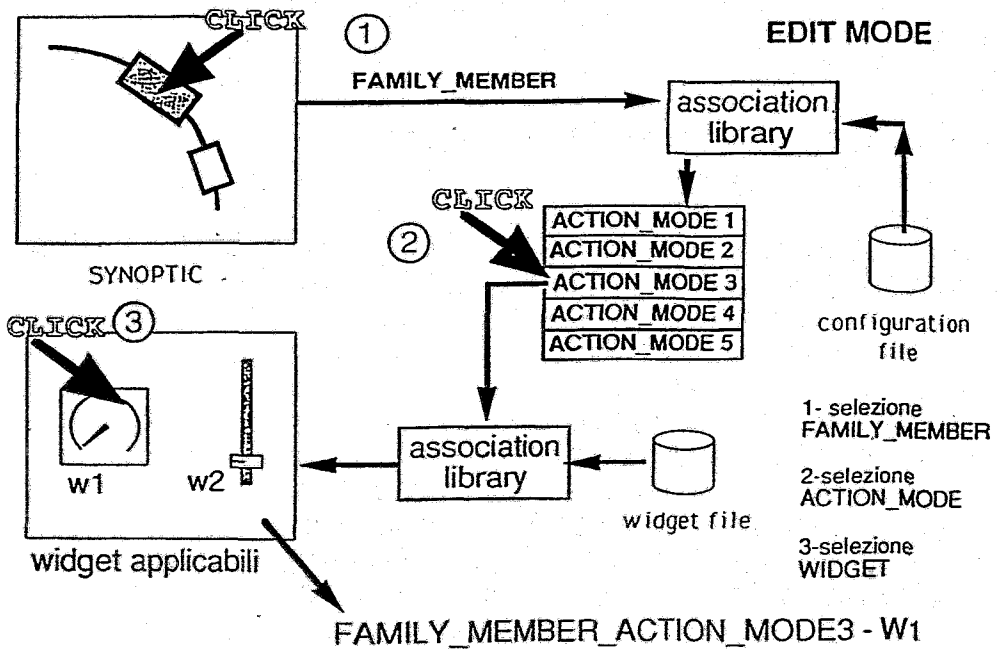


Abbildung 12.5: Phasen des Kontrollpaneel-Editors

Auf ein Paneel können Bedienelemente für verschiedene Komponenten gelegt werden. Verschiedene graphische Eigenschaften des Paneels und der Bedienelemente, wie Größe, Position, Titel, usw. werden beliebig eingestellt. Ist der Benutzer mit dem Aussehen des Paneels zufrieden, schaltet er vom Design- in den Testmodus. Dadurch wird sofort die Verbindung mit dem Rest

des Kontrollsystems hergestellt und das Paneel erlaubt die unmittelbare Manipulation der Komponenten. Es kann beliebig vom Test- in den Designmodus und zurück umgeschaltet werden, um zwischendurch die Bedienelemente zu verändern, zu löschen, oder um neue Bedienelemente dazu zu geben. Letztendlich besteht die Möglichkeit einen C-Quelltext für das erzeugte Paneel zu generieren, um das Paneel als feste Einheit in das MMI einzubinden.

Das X11-System ist die Grundlage für alle graphische Programme des Kontrollsystems. Die reiche Auswahl an Funktionen zur Erzeugung und Manipulation der Widgets und bereits bestehende Bibliotheken mit vielen Widgets bilden die Entwicklungsumgebung für CPE. Für die am Anfang beschriebenen Eigenschaften der Synoptik des MMI ist das X11-System jedoch unzureichend. Es ist Bitmap orientiert und vollkommen ungeeignet für Zoom und Pan oder um graphische Objekte hierarchisch zu speichern. Deshalb wird für diesen Teil des MMI auf PHIGS zurückgegriffen. PHIGS ist ein ISO Standard für vektorielle Graphik, daß über PEX (PHIGS Extension for X11) vollkommen in die X11 Umgebung integriert werden kann.

Das MMI beruht auf einer komplexen Datenstruktur, die in mehreren Tabellen in einer Datenbank der Beschleunigeranlage gespeichert ist und bei der Initialisierung in das MMI geladen werden und spezifisch für das MMI zurechtgeordnet werden. Die Hierarchie der Anlage ist zu vielfältig um mit einer Baumstruktur vollkommen beschrieben zu werden. Das MMI führt deshalb die Beziehungen zwischen Komponenten und Gruppen in einer allgemeinen Graphstruktur.

### **12.8.2 Trendmanager**

Um eine routinemäßige Überwachung von Parametern während der Betriebsperioden des Beschleunigers zu erreichen (dies ist dann besonders wichtig, wenn z.B. durch langsame Drifts einer Versorgungsspannung o.a. wichtige Strahlparameter negativ beeinflusst werden), wird eine Applikation langfristige Trends in der Entwicklung von Parameterwerten aufzeichnen und überwachen. Durch das Synchronisationssystem der Online-Datenbank kann jede Wertänderung registriert werden. Verläßt ein Wert innerhalb einer vorgegebenen Zeit ein definiertes Akzeptanzintervall, kann ein Alarm ausgelöst werden.

### **12.8.3 Alarmmanager**

Die Verarbeitung von Alarmmeldungen im Kontrollsystem erfolgt auf Applikationsebene durch den Alarmmanager. Dieses Programm empfängt Alarmmeldungen aus allen Bereichen und stellt die dekodierten Meldungen auf einem oder mehreren Fenster(n) der Bedienerkonsolen dar. Alarmmeldungen sind im ROSY-Kontrollsystem durch mehrere "Level" klassifiziert. Der Alarm-Manager gestattet die Selektion einzelner Level, die Auswahl von Schwellen für die Darstellung und erlaubt bei Bedarf auch die Abfrage von weiteren Details, die

z.B. aus der Backbone-Datenbank stammen können. Die Oberfläche entspricht dem ROSY Applications Style Guide.

Die Regelmaschinen in der Kontrollebene können bei entsprechender Programmierung Alarme generieren, falls eine Kombination registrierter Parameterwerte ein Fehlverhalten eines Subsystems anzeigt. Durch die iterative Bildung "heuristischer" Regeln kann so eine intelligente Generierung und Verarbeitung von Alarmmeldungen erfolgen, ohne daß - wie sonst oft beobachtet - der Operateur durch plötzlich in großer Menge auftauchende Meldungen überfordert wird (meistens sind alle dann gemeldeten Alarme auf eine oder wenige Ursachen zurückzuführen).

Zur weiteren Analyse von Fehlermeldungen kann ein Expertensystem eingesetzt werden. Durch das Synchronisationssystem der Online-Datenbank kann die Auswerteeinheit des Expertensystems genau dann angestossen werden, wenn bestimmte Status- bzw. Alarmmeldungen vorliegen. Das System kann dann zur weitergehenden Fehlerdiagnose verwendet werden.

#### **12.8.4 Datenlogger**

Besteht Bedarf nach einer vollständigen Überwachung eines oder mehrerer Parameter, so kann der Datenlogger zum Einsatz kommen. Diese Applikation protokolliert jeden gewünschten Parameterwert. Eine Protokollierung kann in regelmäßigen oder definierbaren Zeitintervallen erfolgen, durch das Synchronisationssystem der Online-Datenbank getriggert werden, oder bei Über- bzw. Unterschreiten eines vorgegebenen Grenzwertes starten bzw. stoppen. Die "Geschichte" eines oder mehrerer geloggtter Parameter kann jederzeit über die grafische Oberfläche der Applikation angezeigt werden.

#### **12.8.5 Simulationsprogramme**

Die Inbetriebnahme eines Speicherringes und die nachfolgende Optimierung der Strahlparameter (Emittanz, Lebensdauer u.a.) machen in der Regel den Einsatz eines theoretischen Beschleunigermodells notwendig. Ein Simulationsprogramm kann dann bei Vorgabe der theoretischen Maschinenoptik Richtwerte für die Einstellung einzelner Parameterwerte liefern. Durch die Integration eines solchen Simulators in das Kontrollsystem kann darüber hinaus erreicht werden, daß eine real (durch das Kontrollsystem ermittelte) vorliegende Maschinenoptik als Eingangsgröße einer Simulation dienen kann. Ein Vergleich der daraus berechneten Werte mit observierten Daten (z.B. Strahlage, Arbeitspunkt o.a.) ist für die weitere Optimierung von großem Vorteil.

Durch Ankopplung an das Synchronisationssystem kann eine Neuberechnung relevanter Parameter der Simulation momentan erfolgen, sobald eine wichtige Wertänderung (z.B. IST-Arbeitspunkt und -Lage) gemessen wurde. Darüber hinaus liefert der Simulator die von anderen Applikationen benötigten Maschinenparameter wie die optischen Funktionen, Chromatizität, Dämpfungszeiten

u.a. Durch dieses Konzept wird ein Simulator integraler Bestandteil des Kontrollsystems.

### **12.8.6 Interaktive Strahlagekorrektur**

ROSY verwendet zwei Systeme zur Strahlagekorrektur. Ein schnelles System sorgt mit einem Feedback-Mechanismus für eine Stabilisierung des Quellpunktes der Synchrotronstrahlung der einzelnen User-Beamlines. Ein anderes System wird für die Optimierung der Strahlparameter (im wesentlichen der Lebensdauer) die Rohdaten des BPM-Systems verwenden, um die bestmögliche Annäherung an den "golden orbit" zu erreichen. Letzterer Ansatz wird auf der Applikationsebene zum Einsatz kommen. Ein dediziertes Programm liest neben den Arbeitspunkten die Lagedaten der einzelnen BPM's, berechnet die Strahlablagen gemäß der für die einzelnen Monitore gemessenen Kalibrierungsdaten und ermittelt anhand verschiedener Algorithmen (z.B. least-squares oder harmonische Analyse) die Korrektorstärken. Diese "offline"-Berechnungen werden durch Interaktion des Operators gesteuert, durch qualitativ hochwertige Grafik zur Darstellung von Orbits unterstützt und besitzen in der Regel zusätzlich eine Vielzahl unterschiedlicher Optionen.

### **12.8.7 Strahldiagnose und Untersuchungen zur Strahldynamik**

Die Strahldiagnose und die gewünschten Untersuchungen zur Strahldynamik machen die Entwicklung einer High-Level-Applikation notwendig, die mit den Rohdaten des BPM-Systems und anderer Systeme (z.B. Synchrotronlicht-Monitore) operieren kann. Diese Applikation muß ausgewählte Verfahren der digitalen Signal- und Bildverarbeitung anbieten, woraus durch eine einfache Skript-Sprache automatische Auswerteprozeduren realisiert werden können. Diese Auswerteprogramme sollten dann für die Messung von Chromatizität, Dispersionswerten, Strahlemittanz, Beta-Funktion usw. entwickelt werden. Höher spezialisierte Aufgaben, die sich nicht mit den Mitteln dieser Universal-Applikation bearbeiten lassen, machen sonst die Entwicklung spezieller Software notwendig, die die allgemeine Applikationsschnittstelle des Kontrollsystems verwendet.

Die Möglichkeit, komplexere Signalanalysen "per Knopfdruck" zu starten und die Ergebnisse interaktiv einsehen zu können, hat sich bei vergleichbaren Beschleunigern als unverzichtbares Element während der Inbetriebnahme und des Routinebetriebs erwiesen, und stellt den heutigen Stand der Technik dar. Die erarbeiteten Meßprozeduren können in Verbindung mit einem Simulator wertvolle Hinweise auf das Strahlverhalten liefern, die zu einer Optimierung der Betriebsparameter führen können.

### 12.8.8 Automatisierung von Meß- und Steuersequenzen

Durch Entwicklung einer kommandoorientierten, interaktiv arbeitenden Applikation besteht die Möglichkeit, Steuersequenzen in Form von "Skripten" zu programmieren und von der Bedieneroberfläche aus anzustoßen. Durch diesen Ansatz können eine Vielzahl wiederholt auftauchender Routineoperation beim Einschalten und Betrieb der Anlage in automatisierte Steuerabläufe gefaßt werden. Werden entsprechende Kontrollstrukturen bereitgestellt, kann die "Skript-Sprache" sogar einfache Regelschleifen ausführen. Eine Kombination mit den Elementen der Signalverarbeitung erweitert diesen Ansatz dahingehend, daß Regelprozeduren auf Ergebnisse von Meßprozeduren zugreifen und reagieren können. Ein Beispiel hierzu wäre die automatische Aufnahme von Eichkurven (z.B. des HF-Systems).

Als Beispiel für ein solches System kann das an der Bonner Beschleunigeranlage ELSA entwickelte EPOS-System ([Go 90], [Pi 91]) dienen.

## 12.9 Strahldiagnose, Feedbacksysteme und Regelungen

Das Kontrollsystem, das Timingsystem und alle Elemente der Strahldiagnose bilden eine Einheit, wobei dem Kontrollsystem eine übergeordnete, integrierende und ordnende Funktion zukommt. Das Kontrollsystem benötigt die Angaben aus der Strahldiagnose, um die Beschleunigeranlage in einen optimalen Arbeitsbereich zu steuern und auch Eingabesignale für schnelle Feedbacksysteme und Regelungen zu liefern. Um optimale und reproduzierbare Bedingungen für den Betrieb der Beschleunigeranlagen sicherstellen zu können, ist eine Feinabstimmung der drei genannten Systeme die Grundvoraussetzung.

### 12.9.1 Minimalbestandteile der Strahldiagnose im Kontrollsystem

Wichtige Bestandteile der Strahldiagnose müssen bereits zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Beschleunigeranlagen verfügbar sein. Der Umfang kann dann mit wachsender Erfahrung im Beschleunigerbetrieb durch spezialisierte Diagnostik ergänzt werden.

Unter den geforderten Bestandteilen verstehen wir die

- Messung von Strahlspektren des Lagesignals aus beiden transversalen Strahlrichtungen, und daraus die
- Bestimmung der Arbeitspunkte  $Q_x$  in horizontaler Richtung und  $Q_z$  in vertikaler Strahlrichtung
- Schnelle Arbeitspunktbestimmung über wenige Strahlumläufe oder mit mehreren BPMs auf der Zeitskala eines Umlaufs in ROSY
- Einsatz von dedizierten Synchrotronlichtmonitoren mit angeschlossener Bildverarbeitung zur quantitativen Profil- und Lagebestimmung in ROSY, darüber

hinaus auch der Einsatz von XRBPMS (X-Ray beam position monitors) in den User-Beamlines.

- Messung von Bunchlängen und longitudinalem Strahlprofil durch geeignete Hardware
- genaue Strommessung in ROSY mit Hilfe eines schnellen Toroidmonitors
- Diagnose in den Transferkanälen zwischen den Beschleunigerteilbereichen (z.B. Folienmonitore mit Bildauswertung, Gittermonitore, Toroidmonitore zur Ladungsbestimmung)
- Messung der Chromatizität
- Messung des Closed Orbit

Die meisten Messungen können automatisiert werden und sollten ständig erfolgen, damit eine kontinuierliche Strahlkontrolle möglich ist. Andere Messungen sollten auf Anfrage des Operators, vermittelt durch das Kontrollsystem, durchführbar sein. Nur so kann die Inbetriebnahmezeit der Beschleunigeranlagen minimiert werden.

### **12.9.2 Feedbacksysteme zur Behandlung von Instabilitäten**

Es ist zu erwarten, daß der maximal in ROSY erreichbare Strahlstrom durch eine Vielzahl von physikalischen Effekten limitiert sein wird. Hierzu gehören unter anderem Multibunch-Instabilitäten, deren Behandlung in der Regel breitbandige Feedbacksysteme notwendig machen. Ein solches Feedbacksystem wird heute meistens durch eine schnelle Signalverarbeitungskette realisiert, wobei digitale Filter, Resonatoren etc. durch spezialisierte Hardware implementiert werden. Die erforderlichen Verarbeitungsbandbreiten können natürlich nicht durch Standardkomponenten des Kontrollsystems bereitgestellt werden. Für die optimale Integration solcher Systeme in die Kontrolle ist es daher wesentlich, daß wichtige Teile der Hardware im Prozeßsystem eingebunden sind und daß die Systemressourcen (d.h. Steuergrößen, Konfigurationsvariablen) als Kontrollsystemparameter verwaltet werden. Damit hat der Operateur einen transparenten Zugriff auf solche Feedbacksysteme, und deren Einstellungen und Überwachung kann im Rahmen standardisierter Prozeduren durch das Kontrollsystem (d.h. eine Applikation) durchgeführt werden.

### **12.9.3 Schnelle Strahlagekorrektur**

Ein schnelles Feedback-System sorgt für eine Stabilisierung des Quellpunktes der Synchrotronstrahlung der einzelnen User-Beamlines. Es basiert auf lokalen 4-Punkt-Beulen zur Herstellung definierter Ablagen und Winkel am Quellpunkt. Dieses System zur Strahlagekorrektur ist in das Prozeßsystem integriert, da das BPM-System und die Synchrotronlicht-Monitore ebenfalls in diese Schicht eingebunden sind und eine breitbandige Übertragung von Daten vom BPM-System über die Berechnungshardware zum Korrektorsystem notwendig ist. Durch eine Konzentration der Hardware (Prozessoren u.a.) an wenigen Stellen kann die gewünschte Durchsatzleistung erreicht werden (im Idealfall Crate-

lokal mit der Netto-Bandbreite des VME-Busses). Die Berechnungseinheit selbst kann aus mehreren VME-Modulen mit digitalen Signalprozessoren bestehen, die die erforderlichen Operationen (Matrix-Inversionen u.a.) durchführen. Durch unmittelbare Weitergabe der Ergebnisse an die Korrektormagnete (ebenfalls im Prozeßsystem angebunden) kann die Zeitdauer eines Iterationszyklus sehr gering gehalten werden. Das System muß durch Kontrollsystem-Parameter (z.B. Soll- und IST-Arbeitspunkt) beeinflußt, d.h. konfiguriert und gesteuert werden können.

## 12.10 Timing- und Triggersystem

Das Trigger- und Timing-System des ROSY-Beschleunigers versorgt alle relevanten Komponenten der Anlage mit entsprechenden Steuerpulsen und beinhaltet auch die Programmierung bzw. Vorbereitung der Subsysteme zur Strahldiagnose (Triggerbedingungen etc.). Obwohl die verwendete Hardware in der Regel hochspezialisiert ist, wird das Trigger- und Timing-System als integraler Bestandteil des Kontrollsystems aufgefaßt, da es die Synchronisierung aller hardwarespezifischen Kontrollsystemparameter regelt. Ein Betriebszustand ist durch die Menge der gesteuerten Parameter, ihre Werte und die entsprechend Synchronisierung realisierbar.

Das Timing- und Triggersystem wird vollständig durch Kontrollsystemparameter verwaltet. Alle beteiligten Geräte (Triggeregeneratoren, HF-Teiler, Delay-Einheiten etc.) werden an das Prozeßsystem angeschlossen. Durch Entwicklung spezieller 'Regeln' können in der Kontrollebene durch die Regelmaschinen die einzelnen Parameterwerte so berechnet werden, daß ein konsistenter Maschinenzustand erreicht wird. Dies soll bedeuten, daß die Timingwerte für LINAC und Booster-Synchrotron, das Timing der Injektion in ROSY und die nachfolgende Rampphase - ausgehend von durch den Operateur gemachten Vorgaben - berechnet und an die Hardware übermittelt wird. Aus Sicht der Operator- bzw. Applikationsebene kann so mit allgemeineren Zyklus-Definitionen gearbeitet werden, ohne daß die Bedeutung einzelner Delays explizit sichtbar wird. Diese Transparenz erleichtert die Einstellung des Beschleunigers erheblich.

Beim Bau bzw. der Beschaffung spezieller Hardware (z.B. Hochfrequenz-Teiler, Delayketten, HF-Generatoren u.a.) ist darauf zu achten, daß die wesentlichen Steuergrößen als Kontrollsystemparameter verfügbar gemacht werden müssen. Dies ist besonders wichtig bei der Entwicklung spezieller VME-Module, wo bereits in der Design-Phase eine entsprechende Steuerbarkeit aller Parameter über den VME-Bus sichergestellt sein muß.



## 13 Gebäude

### 13.1 Experimentierhalle mit Speicherring

Der Speicherring befindet sich in einer Halle mit kreisförmigem Grundriß, der wirtschaftlichsten Bauform für eine solche Anlage (siehe Abbn. 13.1, 13.2 und Tab. 13.1). Der Durchmesser der Halle beträgt ca. 92 m und wird durch die Abmessungen des Speicherringes ( $D = 45 \text{ m}$ ) und den für den Aufbau von Experimentierstationen erforderlichen Freiraum bestimmt (Abbn. 13.3 und 13.4). Aus der Notwendigkeit, zum Aufbau und zur Wartung des Speicherringes sowie zum Auf- und Abbau von Experimenten möglichst jeden Punkt der Halle mit Hilfe einer Kranbahn erreichen zu können, resultiert eine stützenfreie Konstruktion der Halle. Die bautechnische Folge dieser Notwendigkeit ist ein zentrisches Auflager der Dachkonstruktion, das die hauptsächliche Windaussteifung bietet und auch die Kranbahn aufnimmt. Der aussteifende Stahlbetonturm in der Mitte hat einen Außendurchmesser von 6 m. Im Inneren des Turmes gewährleistet eine im Keller beginnende Wendeltreppe die Zugänglichkeit sowohl der Kranbahn als auch des Daches.

Das Dachtragwerk besteht aus der Dachhaut (Pappe auf 24 mm Holzschalung) und Holzpfetten, die auf radial angeordneten Bindern liegen. Neben dem niedrigen Eigengewicht haben diese den Vorteil, daß die Beleuchtung und Klimakanäle nahezu beliebig nach den Erfordernissen des Nutzers verlegt werden können, ohne den Kran zu beeinträchtigen.

Zur Vermeidung von Erschütterungen werden die Fundamente der Baulichkeiten streng vom Speicherring und der diesen umgebenden Strahlenschutzmauer aus Schwerbeton getrennt. Die Außenwände bestehen aus Mauerwerk oder Beton. Dach und Außenfassaden können zum Schutz gegen Aufheizen durch Sonneneinstrahlung mit einer Verkleidung aus Titan-Zinkblech versehen werden. Die vorgesehene Heizung dient lediglich dem Frostschutz, da bei Betrieb die Anlagenwärme für Heizzwecke genutzt werden kann.

Die Krananlage besitzt zwei Laufkatzen, eine für schwere Lasten (100 kN mit Normalgeschwindigkeit) und eine für geringere Lasten (20 kN mit Feinhub). Der Stahlbetonturm ist auf Kellerniveau über einen Versorgungs- und zugleich Fluchttunnel mit dem Bürogebäude (Mehrzweckgebäude) verbunden (siehe Abb. 13.5). Durch diesen Tunnel werden alle Versorgungsleitungen zum Innenraum geführt. Dieser Tunnel ist auch der einzige Personenzugang zum Hallenraum innerhalb der Strahlenschutzmauer.

Für den Fall einer notwendigen Temperierung des Speicherringes ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) ist die Ausbildung eines Tunnels für diesen erforderlich. Eine Klimatisierung von Experimentaufbauten erfolgt im Bedarfsfall durch Einhausung und die Installation entsprechender Anlagen.

## 13.2 Maschinenversorgung und Haustechnik

Die Experimentierhalle ist an der Peripherie in einem Sektor von etwa 60° von einem 6 m breiten Anbau umgeben (siehe Abb. 13.6). In diesem Anbau befinden sich in mehreren getrennten Räumen die Energieversorgungs-einrichtungen für die Magnete, Quadrupole und Sextupole sowie das HF-System am Speicherring, das Booster-Synchrotron, Kühlwasser- und Vakuumpumpen, Regel-, Kontroll- und Leitsysteme, die Haustechnik und die in der Halle zu installierenden Experimente.

Die Freiluftanlage für die Verteilungstransformatoren mit einer Fläche von etwa 250 m<sup>2</sup> befindet sich unweit des Anbaues und ist über Kabelkanäle mit diesem verbunden. Hier werden alle Transformatoren mit einer Leistung > 1 MVA installiert (Abb. 13.6).

In einem in Höhe des 1. Obergeschosses z. T. auf Säulen ruhenden Seitenflügel des Gebäudes befindet sich der Kontrollraum, von dem aus alle zum Betrieb des Speicherringes erforderlichen Elemente und Einrichtungen gesteuert und überwacht werden können.

## 13.3 Mehrzweckgebäude

Das Mehrzweckgebäude befindet sich direkt an der Experimentierhalle und ist über einen Zugang mit dieser verbunden (siehe Abb. 13.1). Es ist ca. 33 m lang und ca. 16 m breit. Die Kellersohle des Gebäudes befindet sich 3,7 m unter der Eingangsebene. Der Keller ist im wesentlichen der Haustechnik wie Elektro-, Notstrom-, Wasser- und Fernwärmeanschluß sowie weiterer spezieller Technik wie Kompressoren, Wasseraufbereitung, Kälteanlagen und Batterieanlagen vorbehalten. Darüberhinaus bietet er Platz für Nebenräume wie Archiv, Waschräume usw. Der Keller ist über eine Rampe mit Gabelstapler oder anderen Kleinfahrzeugen erreichbar.

Im Erdgeschoß und im 1. Obergeschoß (siehe Abb. 13.7 bis 13.9) befinden sich im wesentlichen Arbeitsräume wie Büros, Labors und Beratungsräume. Diese sind längs der Außenwände des Gebäudes angeordnet, während sich in der fensterlosen Gebäudemitte WC-Räume, Garderoben und Foyer bzw. Dispositionsflächen befinden, die je nach Bedarf als Beratungsräume, Ausstellungsfläche oder als Arbeitsplätze mit künstlicher Beleuchtung genutzt werden können.

Erdgeschoß und 1. Obergeschoß sind wegen der Notwendigkeit umfangreicher Verkabelung von EDV- und elektrischen Geräten durchweg mit einem 30 cm hohen Stelzenfußboden ausgerüstet.

Im 2. Obergeschoß (siehe Abb. 13.9) sind 6 Gästeappartements vorgesehen. Damit wird dem Anliegen Rechnung getragen, daß die Anlage Forschungs- und Arbeitsplatz vieler Gäste auch von ausländischen Institutionen sein soll.

## 13.4 Standortwahl

Bei der Standortwahl für die Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle mit den oben beschriebenen Gebäuden und Anlagen auf dem Territorium des Forschungsstandortes Rossendorf wurden nicht nur die spezifischen Anforderungen berücksichtigt, sondern auch die weiteren Objekte, die hier zu einem späteren Zeitpunkt errichtet werden könnten. Dies sind insbesondere ein weiterer Speicherring als Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation (ROSY II) sowie ein (supraleitender) Linearbeschleuniger als möglicher Injektor für ROSY. Diese beiden Objekte dürften etwa folgende Dimensionen haben:

- ROSY II : D = 140 m
- Linearbeschleuniger: 25 m x 100 m

Für den im Abb. 13.10 dargestellten Standort sprechen folgende Argumente:

- die Größe des zur Verfügung stehenden Geländes (ca. 150 m x 350 m)
- das Geländeprofil (maximale Höhenunterschiede ca. 25 m - andere Standorte sind zwar z. T. ebener, erfüllen aber weitere Anforderungen nicht)
- die Lage außerhalb der Umfriedung kerntechnischer Anlagen
- die Nähe zu einer Straße innerhalb des Geländes des Forschungsstandortes, die ausreichende Distanz zur Bundesstraße 6 außerhalb desselben
- die Nähe zur Haupteinspeisung der Medien (sowohl Wasser als auch Wärme, insbesondere aber Elektroenergie, deren Bedarf bei dem Energieversorgungsunternehmen bereits angemeldet wurde).

Bei der im Abb. 13.10 getroffenen Anordnung ergeben sich für die einzelnen Gebäude maximale Höhenunterschiede von 10...12 m, für die Fundamente des Speicherrings sogar noch geringere.

Der Baugrund besteht aus Sanden und Kiesen bis zu 30 m Mächtigkeit. Es folgen Geschiebemergel und Lockergestein, so daß eine gute Tragfähigkeit für Bauwerke gegeben ist. Grundwasser steht in bauwerksrelevanter Tiefe nicht an. Eine Erdbebengefährdung ist nicht gegeben.

Tabelle 13.1: Raumprogramm für das Speicherringgebäude der Synchrotronstrahlungsquelle ROSY

Benennung	Anzahl der Räume	Gesamtfläche [m <sup>2</sup> ]
<b>1.0 TECHNIKRAÜME</b>		
1.1 Fernwärmeanschluß	1	87,25
1.2 Traforäume	-	-
1.3 Energieversorgung	2	83,10
1.4 Niederspannung	1	59,32
1.5 Mittelspannung	1	80,89
1.6 Batterieraum	2	26,47
1.7 Notstrom	2	34,17
1.8 Kompressor	1	13,19
1.9 Wasseranschlußraum	-	-
1.10 Wasseraufbereitung/Kälteanl.	2	221,18
<b>3.0 KONTROLLBEREICH</b>		
3.1 Kontrollraum	1	142,71
3.2 Rechnerraum	1	27,20
3.3 Drucker / Terminals	-	-
3.4 Büroraum	-	-
<b>4.0 BÜRO / VERWALTUNG</b>		
4.1 Büroraum	16	164,96
4.2 Verwaltungsraum	5	51,55
4.3 Büroraum	2	41,96
4.4 Besprechungsraum	1	43,28
4.5 Laborraum	2	41,96
4.6 Schwerlastlabor mit Kran	1	39,29
<b>5.0 EXPERIMENTIERHALLE</b>	1	6648
<b>6.0 NEBENRÄUME</b>		
6.1 WC / Waschanlagen	12	37,66
6.2 Putzmittelraum	2	16,84
6.3 Umkleide-/Personalraum	3	80,80
6.4 Teeküche	-	-
6.5 Büroservice	-	-
6.6 Foyer/Ausstellung/Cafeteria	2	236,68
6.7 Lager / Archiv	12	140,95
<b>7.0 SONSTIGES</b>		
7.1 Treppenhaus	3	112,34
7.2 Erschließungswege	4	170,12
7.3 Fluchtweg Halle	1	108,10
7.4 Gästewohnung	6	142,26

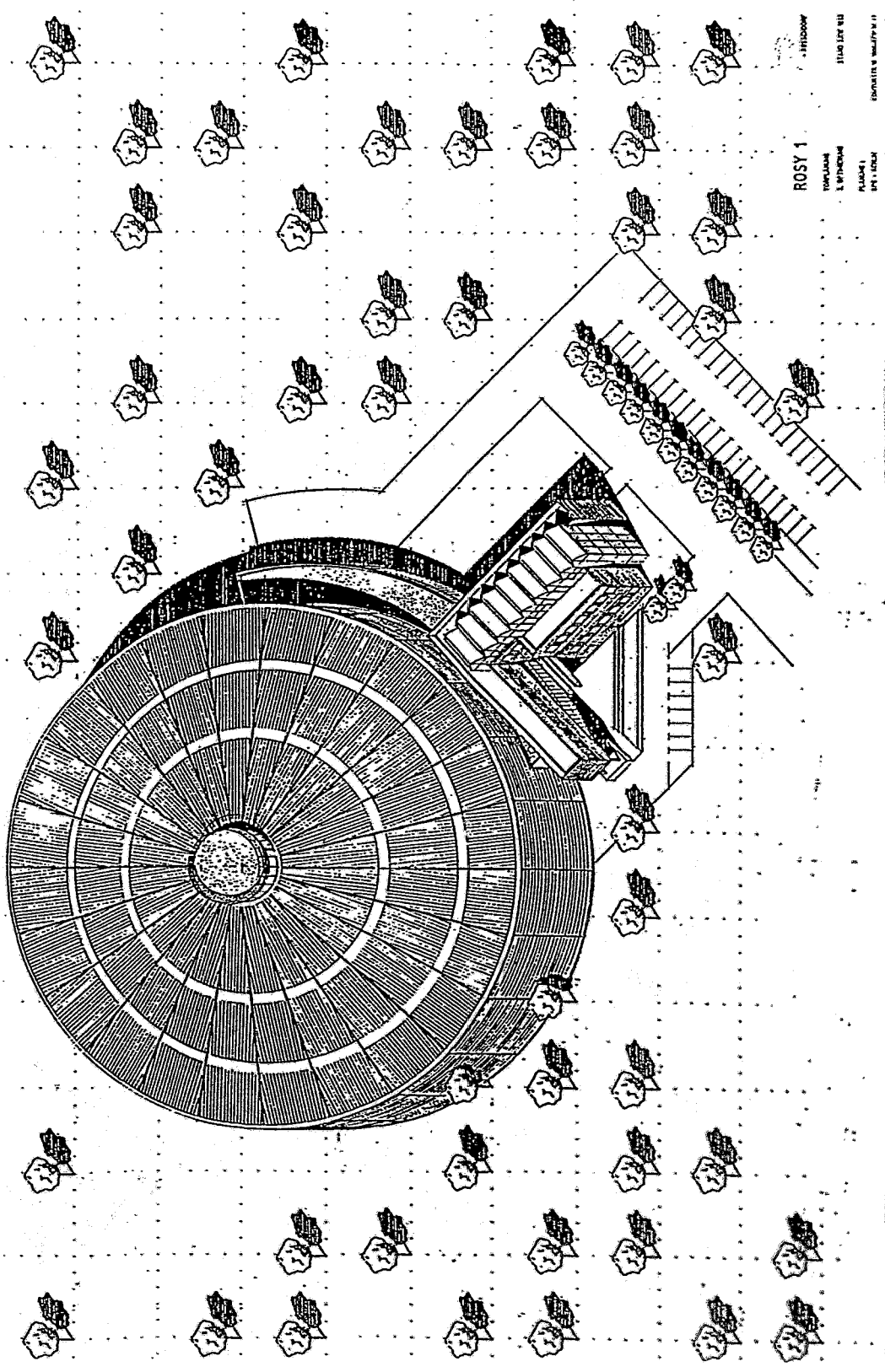
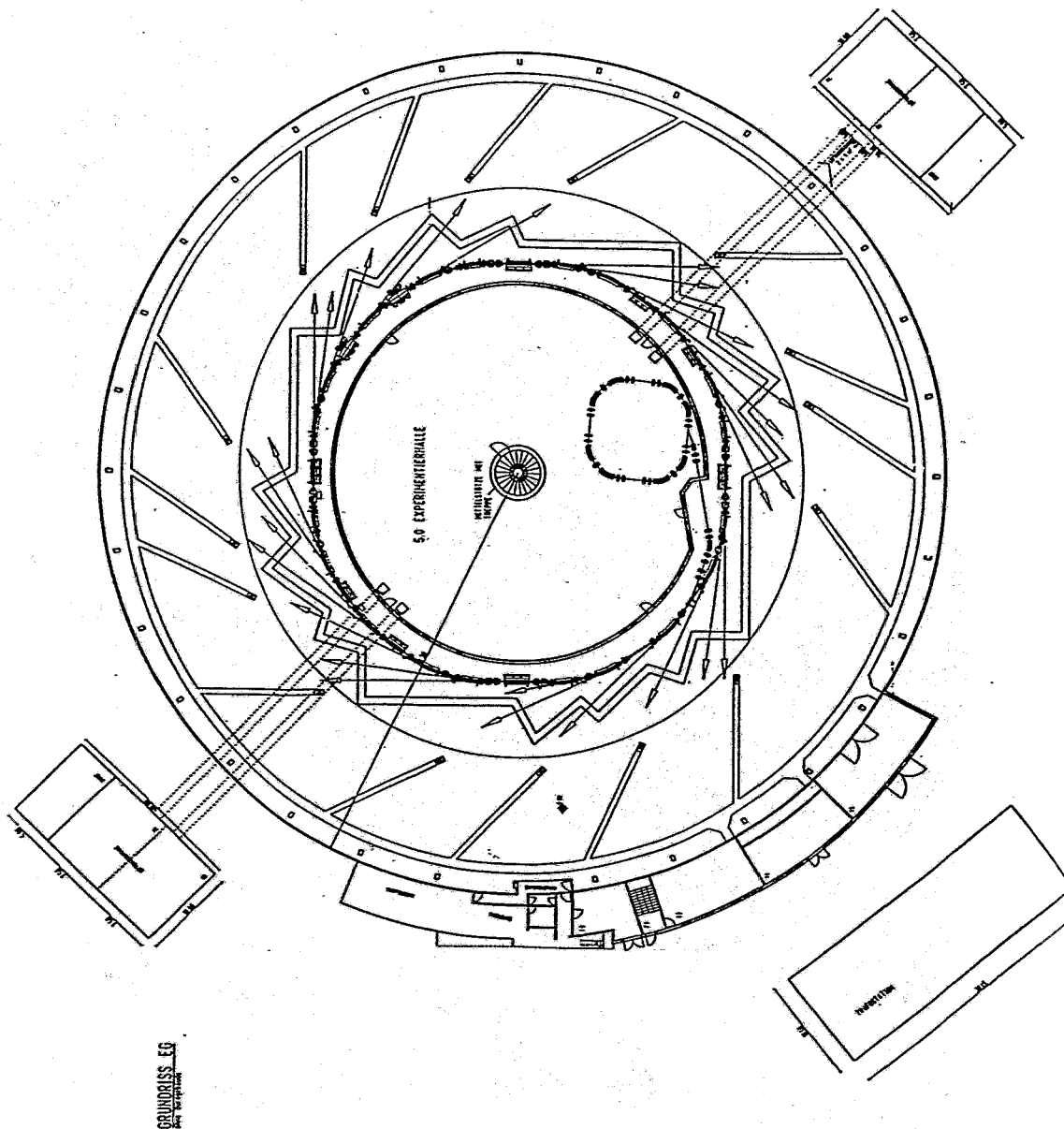


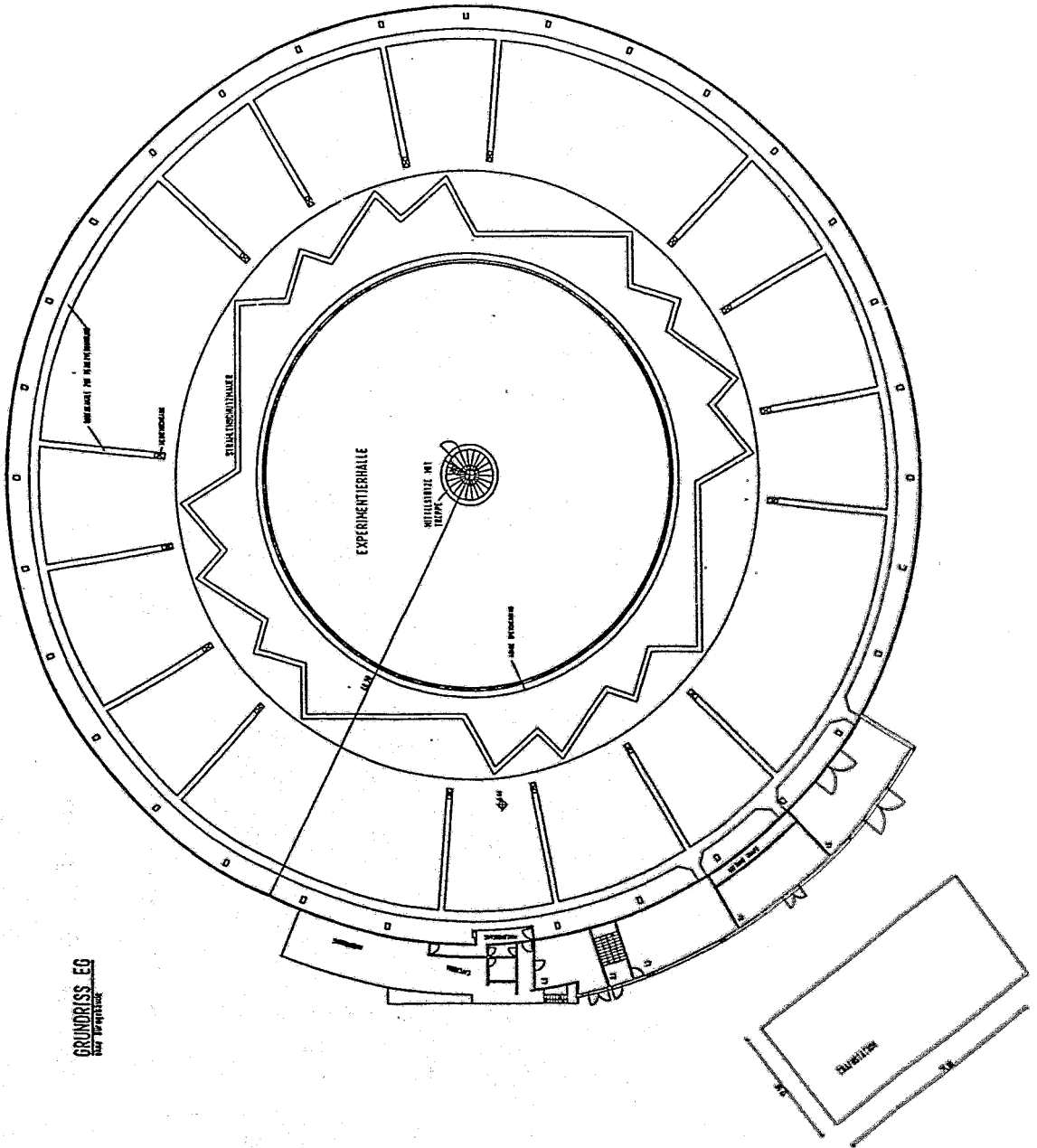
Abb. 13.1: Perspektivische Ansicht des Gebäudes für den Speicherring ROSY



GRUNDRISSE EG  
 1:500

Abb. 13.2: Grundriß der Experimentierhalle des Speicherringes ROSY mit Injektor und Speicherring

- 1.0 TECHNIKRAUME
- 1.1 Fernwärmeanschluss
- 1.2 Trafotürme
- 1.3 Energieversorgung
- 1.4 Niederspannung
- 1.5 Mittelspannung
- 1.6 Batterieraum
- 1.7 Notstrom
- 1.8 Kompressor
- 1.9 Wasseranschlussraum
- 1.10 Wasseraufbereitung/ Kälteanlagen
- 2.0 LINEARBESCHLEUNIGER
- 3.0 KONTROLLBEREICH
- 3.1 Kontrollraum
- 3.2 Rechnerraum
- 3.3 Drucker/ Terminalraum
- 3.4 Büroraum
- 4.0 BÜRO/VERWALTUNG
- 4.1 Büroraum
- 4.2 Verwaltungsraum
- 4.3 Büroraum
- 4.4 Besprechungsraum
- 4.5 Laborraum
- 4.6 Schwerlabor mit Kran
- 5.0 EXPERIMENTIERHALLE
- 6.0 NEBENRÄUME
- 6.1 WC, Waschanlagen
- 6.2 Putzmittelraum
- 6.3 Umkleide-/ Personalraum
- 6.4 Teeküche
- 6.5 Büroservice
- 6.6 Foyer/ Cafeteria/ Ausstellung
- 6.7 Lager- und Archivraum
- 7.0 SONSTIGE
- 7.1 Treppenhaus
- 7.2 Erschließungsweg
- 7.3 Fluchweg Halle
- 7.4 Gästewohnung



GRUNDRISS EG  
VON HERRMANN

Abb. 13.3: Grundriß der Experimentierhalle des Speicherringes ROSY

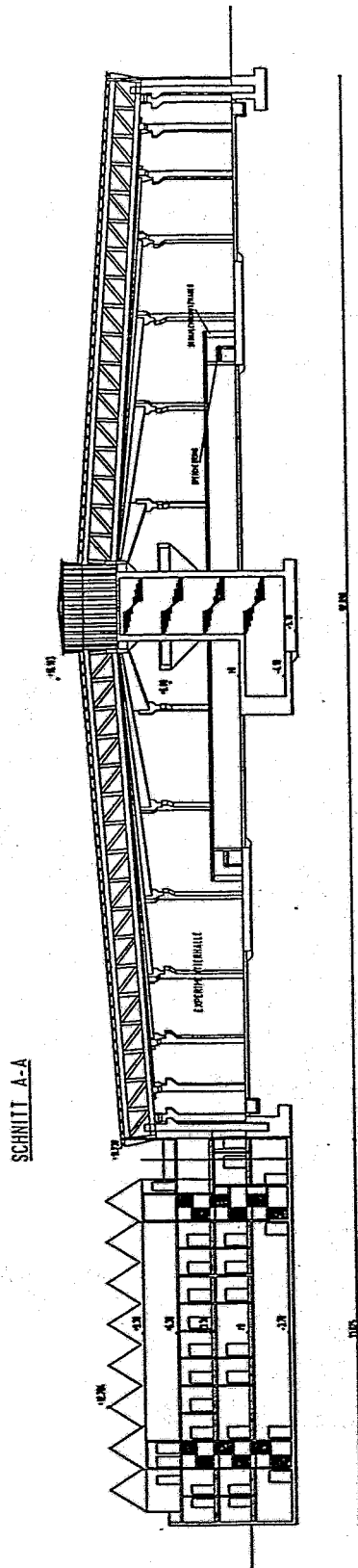
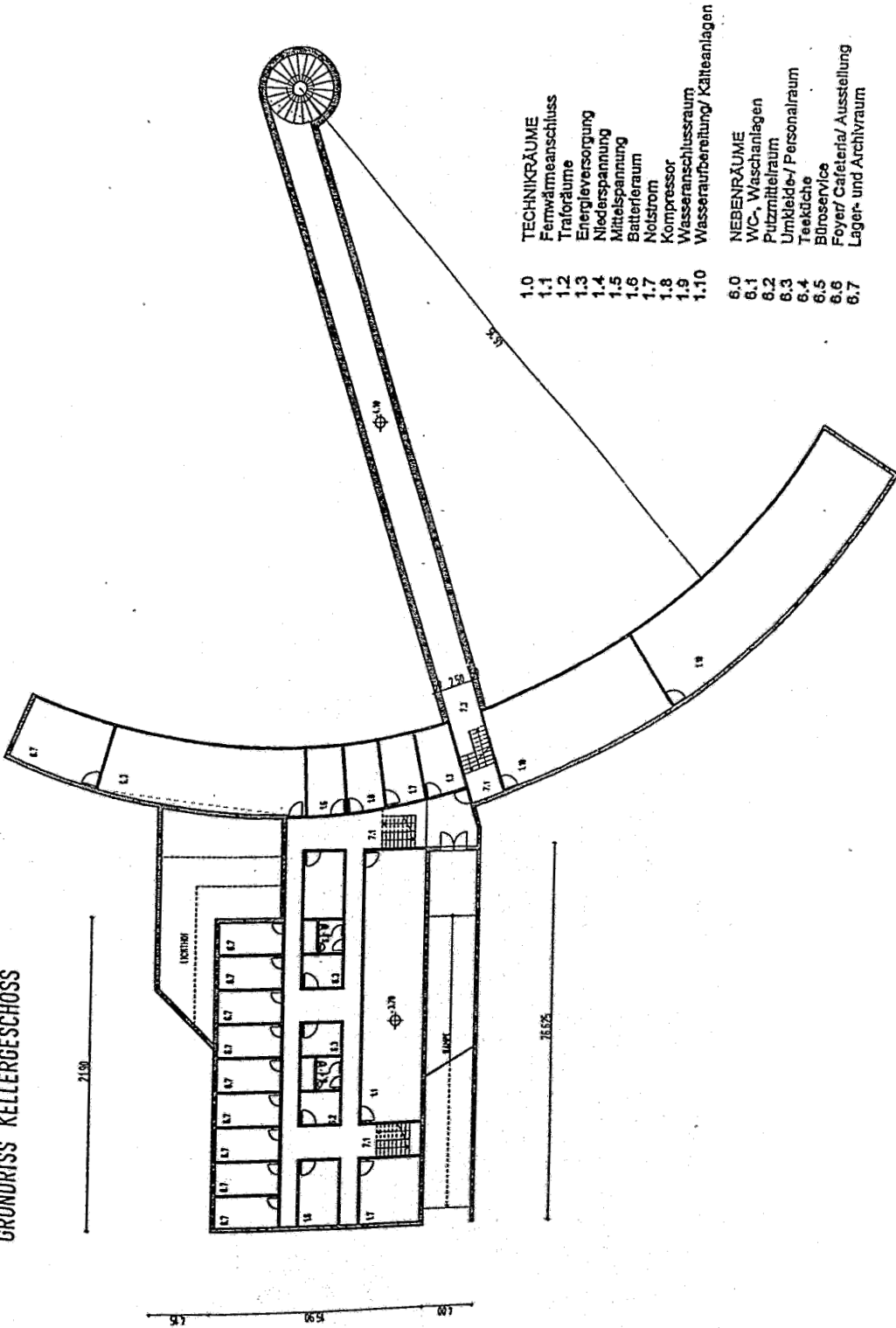


Abb. 13.4: Schnittzeichnung durch das ROSY-Gebäude



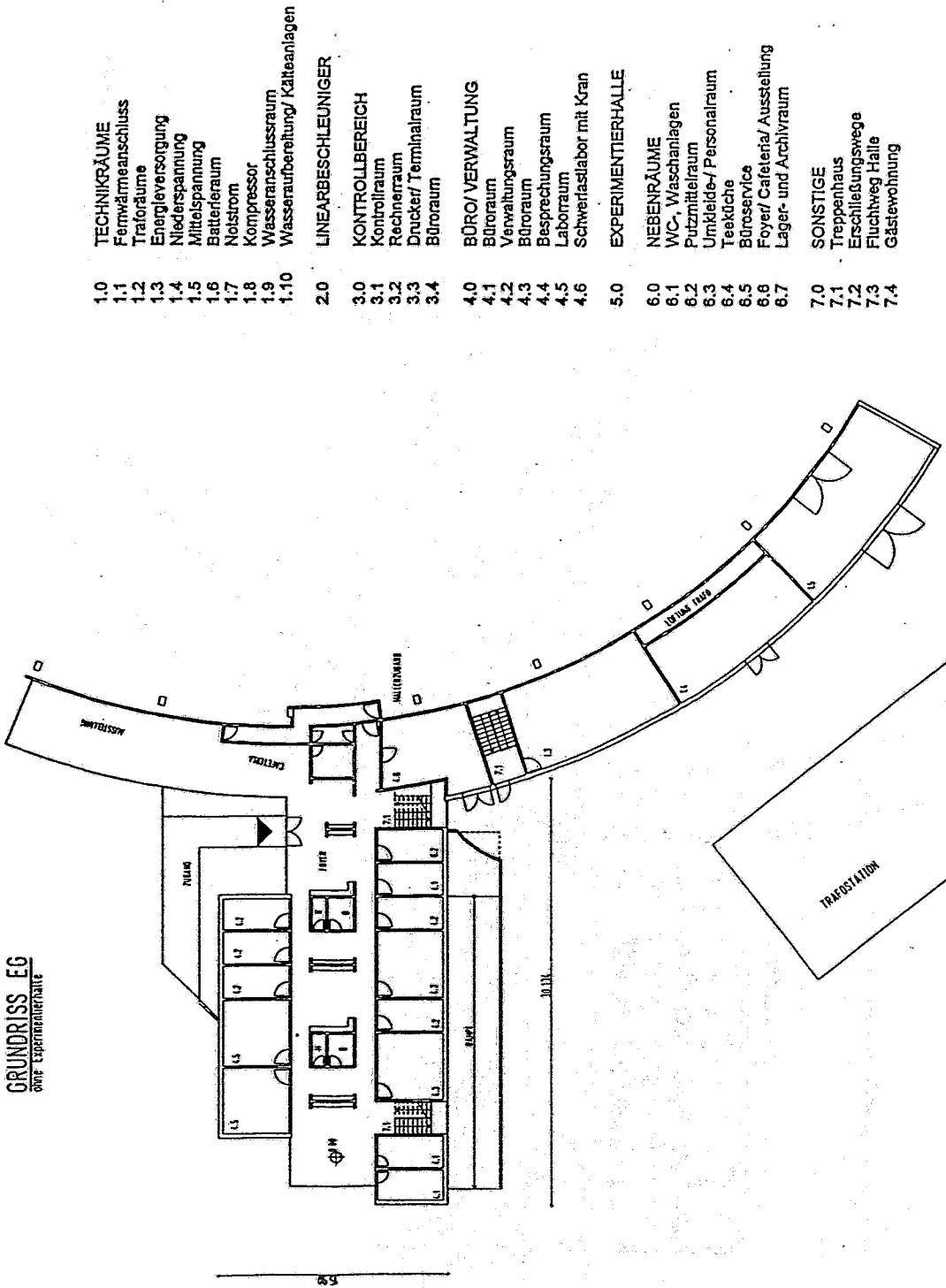
GRUNDRISS KELLERGESSCHOSS



- |      |                                  |
|------|----------------------------------|
| 1.0  | TECHNIKRÄUME                     |
| 1.1  | Fernwärmeschluss                 |
| 1.2  | Trafikräume                      |
| 1.3  | Energieversorgung                |
| 1.4  | Niederspannung                   |
| 1.5  | Mittelspannung                   |
| 1.6  | Batterieraum                     |
| 1.7  | Notstrom                         |
| 1.8  | Kompressor                       |
| 1.9  | Wasserschlossraum                |
| 1.10 | Wasseraufbereitung/ Kälteanlagen |
| 6.0  | NEBENRÄUME                       |
| 6.1  | WC-, Waschanlagen                |
| 6.2  | Putzmittelraum                   |
| 6.3  | Umkleide-/ Personalraum          |
| 6.4  | Teeküche                         |
| 6.5  | Büroservice                      |
| 6.6  | Foyer/ Cafeteria/ Ausstellung    |
| 6.7  | Lager- und Archivraum            |

Abb. 13.5: Grundriß des Kellergeschosses, der Experimentierhalle und des Mehrzweckgebäudes für den Speicherring ROSY

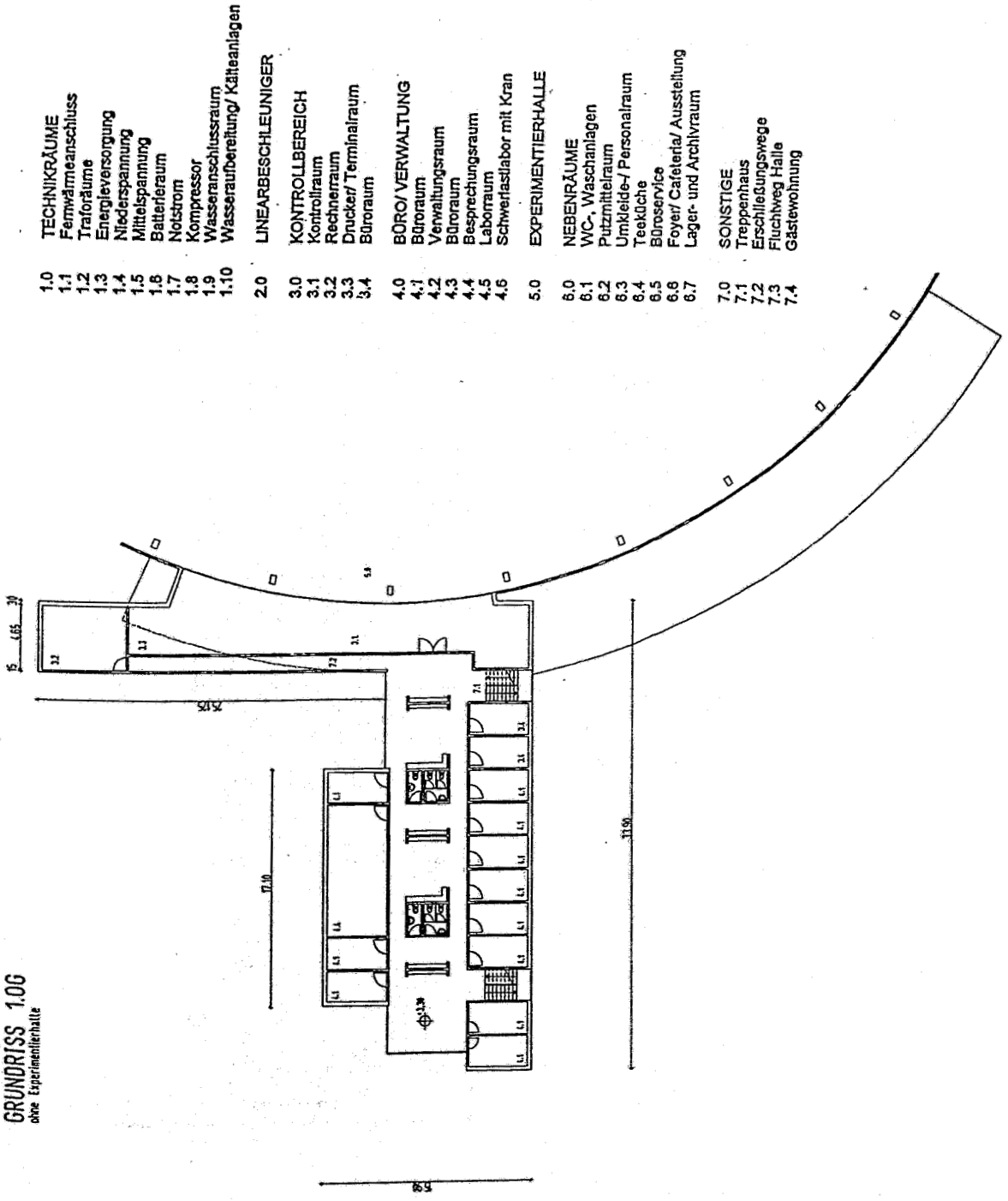
**GRUNDRISS EG**  
eine Experimentierhalle



- 1.0 TECHNKRÄUME
- 1.1 Fernwärmeanschluss
- 1.2 Trafotürme
- 1.3 Energieversorgung
- 1.4 Niederspannung
- 1.5 Mittelspannung
- 1.6 Batterieraum
- 1.7 Notstrom
- 1.8 Kompressor
- 1.9 Wasseranschlussraum
- 1.10 Wasseraufbereitung/ Kälteanlagen
- 2.0 LINEARBESCHLEUNIGER
- 3.0 KONTROLLBEREICH
- 3.1 Kontrollraum
- 3.2 Rechneraum
- 3.3 Drucker/ Terminalraum
- 3.4 Büroraum
- 4.0 BÜRO/ VERWALTUNG
- 4.1 Büroraum
- 4.2 Verwaltungsraum
- 4.3 Büroraum
- 4.4 Besprechungsraum
- 4.5 Laborraum
- 4.6 Schwerfslabor mit Kran
- 5.0 EXPERIMENTIERHALLE
- 6.0 NEBENRÄUME
- 6.1 WC-, Waschanlagen
- 6.2 Putzmittelraum
- 6.3 Umkleide-/ Personalraum
- 6.4 Teeküche
- 6.5 Büroservice
- 6.6 Foyer/ Cafeteria/ Ausstellung
- 6.7 Lager- und Archivraum
- 7.0 SONSTIGE
- 7.1 Treppenhaus
- 7.2 Erschließungsweg
- 7.3 Fluchtweg Halle
- 7.4 Gästewohnung

Abb. 13.6: Grundriß des Erdgeschosses vom Mehrzweckgebäude

**GRUNDRISS 1.0G**  
ohne Experimentierhalle



- |      |                                 |
|------|---------------------------------|
| 1.0  | TECHNIKRÄUME                    |
| 1.1  | Fernwärmeanschluss              |
| 1.2  | Trafoträume                     |
| 1.3  | Energieversorgung               |
| 1.4  | Niederspannung                  |
| 1.5  | Mittelspannung                  |
| 1.6  | Batterieraum                    |
| 1.7  | Notstrom                        |
| 1.8  | Kompressor                      |
| 1.9  | Wasseranschlussraum             |
| 1.10 | Wasserzubereitung/ Kälteanlagen |
| 2.0  | LINEARBESCHLEUNIGER             |
| 3.0  | KONTROLLBEREICH                 |
| 3.1  | Kontrollraum                    |
| 3.2  | Rechnerraum                     |
| 3.3  | Drucker/ Terminalraum           |
| 3.4  | Büroraum                        |
| 4.0  | BÜRO/ VERWALTUNG                |
| 4.1  | Büroraum                        |
| 4.2  | Verwaltungsraum                 |
| 4.3  | Büroraum                        |
| 4.4  | Besprechungsraum                |
| 4.5  | Laborraum                       |
| 4.6  | Schwerlastlabor mit Kran        |
| 5.0  | EXPERIMENTIERHALLE              |
| 6.0  | NEBENRÄUME                      |
| 6.1  | WC-, Waschanlagen               |
| 6.2  | Putzmittelraum                  |
| 6.3  | Umkleide-/ Personalraum         |
| 6.4  | Teeküche                        |
| 6.5  | Büroservice                     |
| 6.6  | Foyer/ Cafeteria/ Aussteilung   |
| 6.7  | Lager- und Archivraum           |
| 7.0  | SONSTIGE                        |
| 7.1  | Treppenhaus                     |
| 7.2  | Erschließungswege               |
| 7.3  | Fluchweg Halle                  |
| 7.4  | Gästewohnung                    |

Abb. 13.7: Grundriß des ersten Obergeschosses des Mehrzweckgebäudes mit angrenzendem Kontrollraum

KONTROLLRAUM  
ohne Experimentierhalle

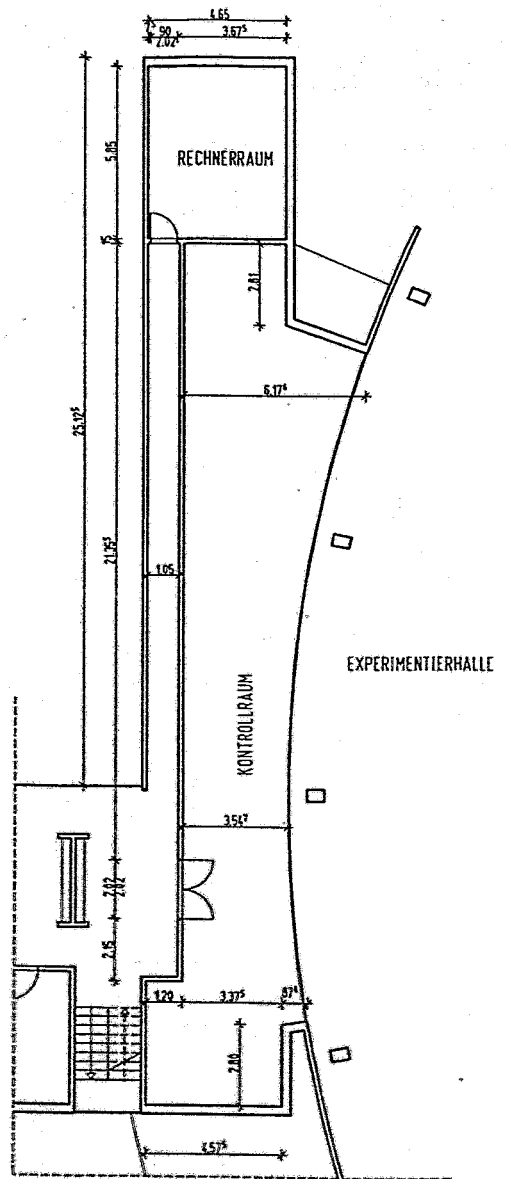


Abb. 13.8: Grundriß des Bereiches Kontrollraum / Rechner

**GRUNDRISS 2.OG**  
ohne Experimentierhalle

- 7.0 SONSTIGE
- 7.1 Treppenhaus
- 7.2 Erschließungswege
- 7.3 Fluchtweg Halle
- 7.4 Gästewohnung

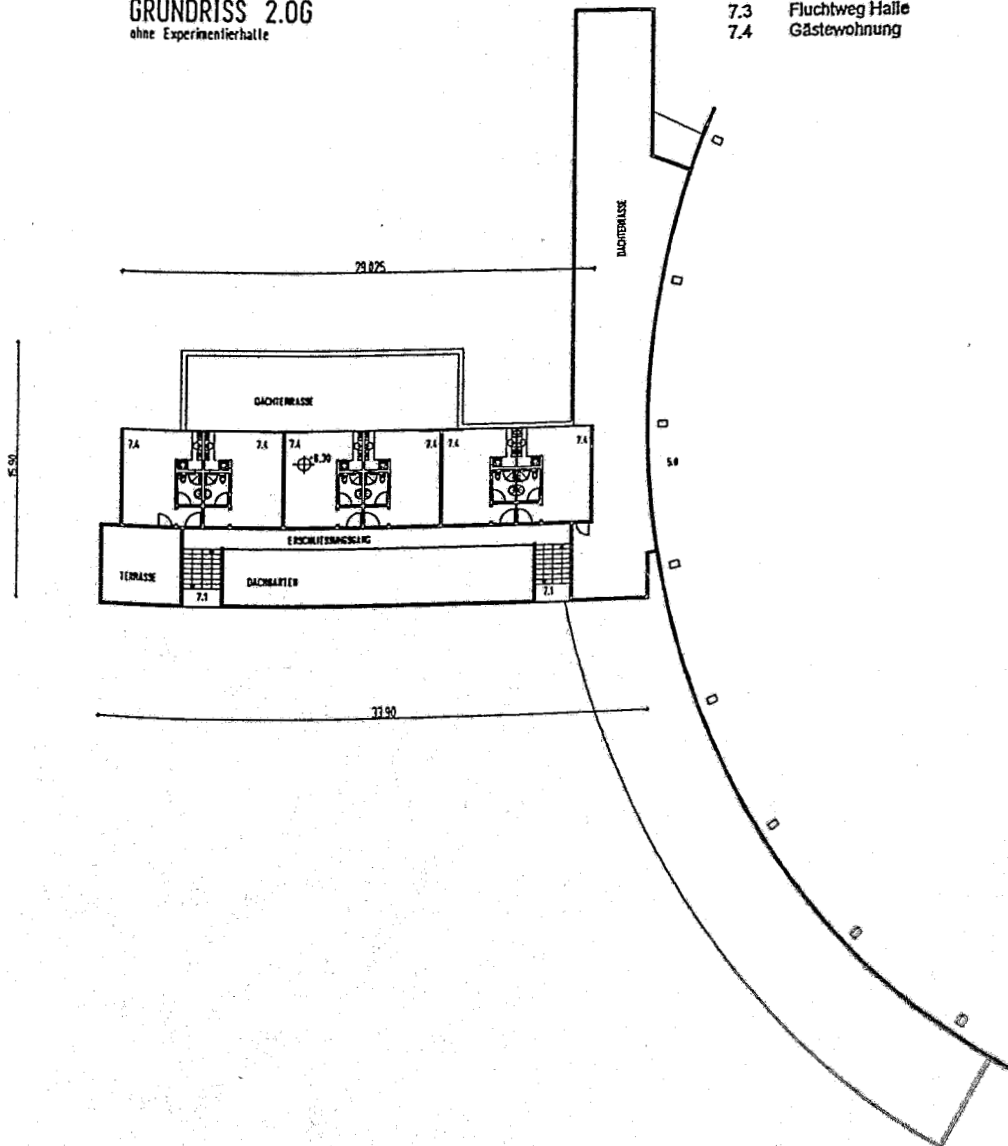


Abb. 13.9: Grundriß des zweiten Obergeschosses mit Gästewohnungen



## Referenzen

### Abschn.1 und 2

- [AL 86] 1 - 2 GeV Synchrotron Radiation Source, Pub - 5172 Rev., July 86, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California 94 720
- [BE 79] D. Einfeld, W.D. Klotz, G. Mülhaupt, Th. Mueller and R. Richter BESSY, A 800 MeV Storage Ring Dedicated to Synchrotron Radiation, IEEE Trans on Nuclear Science, Vol. NS - 26, No 3, June 1978
- [BE 88] BETA User's Guide, L. Farvaque and A. Ropert, ESRF - SR/LAT 88 - 08
- [BE 93] The Status of BESSY II, the High-Brightness Synchrotron Radiation Source in the VUV and XUV Range, G.Wüstefeld, Particle Accelerator Conference, Washington, 14 - 17 May, 1993  
E. Jaeschke, D. Krämer, B. Kuske, P. Kuske, M. Scheer, E. Weihreter, G. Wüstefeld,  
Lattice Design for the 1.7-GeV Light Source BESSY II  
Particle Accelerator Conference, Washington, 14 - 17 May, 1993
- [DE 90] DELTA Status Report 1990, University Dortmund
- [DI 93] V. Suller, M. Poole, and S. Smith, DIAMOND and SINDBAD Projects, ESRF-WORKSHOP: Review of target specifications for storage ring synchrotron radiation light sources and means of achieving them, Grenoble, October 19-20, 1993
- [Ei 92a] D. Einfeld, J. Hormes, D. Husmann and A. Anton, The Low Emittance 2.5 GeV Synchrotron Light Source LISA, Proceedings of the EPAC 92, S.1693-1695, Berlin, 24-28 March, 1992
- [Ei 92b] 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, California, USA
- [Ei 92c] D. Einfeld, D. Husmann and M. Plesko, An Investigation of the QBA-Optics for the Storage Ring LISA, Bonn University, BONN-ME-92-02, August 1992, ISSN-0936-2797
- [Ei 92d] A modified QBA Optics for Low Emittance Storage Rings, FZR 92 - 15, Rossendorf, November 1992  
Nucl. Instr. Meth. A 335 (1993) 402
- [Ei 93a] D.Einfeld and ROSY STAFF, The Synchrotron Light Source ROSY, Particle Accelerator Conference, Washington, 14 - 17 May, 1993
- [Ei 93b] D.Einfeld and ROSY STAFF, The Synchrotron Light Source ROSY, ECCART 93, 12 - 19 September 1993, Orleans, France
- [EL 89] ELETTRA, Conceptional Design Report, Sincrotrone Trieste, Padriciano 99, I-34012 Trieste, Italy
- [ES 87] ESRF - Foundation Phase Report, February 1987, European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, France

- [Ia 93] F. Iazzourene, Effect of Random High Order Multipole Components (above Octupole) in the Storage Ring Bending Magnets on the Dynamic Aperture, STIM-IN-93/1, interner Bericht, Sincrotrone Trieste, Trieste 1993
- [Ja 93] A. Jackson, Commissioning and Performance of the Advanced Light Source, Particle Accelerator Conference, May 17-20, Washington, 1993
- [Li 92] M. Lieuvain, A. Ropert, L. Farvaque, ESRF-The Storage Ring Magnet, Proceedings of the EPAC 92, Berlin, 24-28 March, 1992
- [Ma 89] R. Maier, High Brilliance Lattices, CERN 89 - 01, 89 (1989)
- [Mo 53] H. Motz, W. Thou, R.N. Whitehurst, J.Appl.Phys. **24** (1953) 826
- [Mu 93] J. Murphy, interner Bericht, Forschungszentrum Rossendorf, Mai 1993
- [Nu 92] Nutzung einer zukünftigen Synchrotronstrahlungsquelle, Arbeitstreffen, Dresden, 15.-16. Dezember, FZR 93 - 03, Rossendorf, Januar 1993
- [RA 91] RACETRACK User's Guide, F. Iazzourene, C.J. Bocchetta, R. Nagoka and A. Wrulich, ST/M-9/11, (1991), Sincrotrone Trieste
- [Ro 90a] A. Ropert, High Brilliance Lattices and the Effects of Insertion Devices, CERN 90 - 03, 158 (1990)
- [Ro 90b] A. Ropert, Results of Magnetic Measurements of Storage Ring Quadrupole Prototypes, ESRF-SR/LAT-90-25
- [Ro 92] ROSY, Rossendorfer Synchrotronstrahlungsquelle, FZR 92 -10, Juni 1992, Forschungszentrum Rossendorf e.V.
- [Sc 91] D. Schirmer and K. Wille, DELTA optics, IEEE Particle Accelerator Conference, Vol.5, 2859 - 2861, 1991
- [SL 93] SLS - Konzept Teil II, Vorschlag für den Bau einer Synchrotron-Lichtquelle in der Schweiz, W. Joho et al., Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen, September 1993
- [SO 92] M.-P. Level, M. Sommer, and H. Zyngier, SOLEIL - A New Synchrotron Radiation Source at Orsay, Particle Accelerator Conference, May 17-20, Washington, 1993
- [St 80] A. v.Steenbergen and NSLS STAFF, The National Synchrotron Light Source Basic Design and Project Status, NIM **172** (1980) 25 - 32
- [Ta 93] J.Tanabe, ALS, private Mitteilung, es wurden die Meßergebnisse der Vermessung aller Magnete zur Verfügung gestellt
- [To 93] D. Tommassini, Sincrotrone Trieste, private Mitteilung, es wurden detaillierte Meßergebnisse zur Verfügung gestellt.
- [Wa 93] R. Walker, D. Zagrando, Measurement and Correction of the ELETTRA Storage Ring Dipole Magnets, Particle Accelerator Conference, Washington, 14 - 17 May, 1993
- [Wr 93] A. Wrulich, Sincrotrone Trieste, ESRF-WORKSHOP, Grenoble, October 19-20, 1993
- [Za 93] D. Zagrando, R. Walker, Magnetic Measurements and the Alignment of the ELETTRA-Storage-Ring Quadrupole, Sextupole and Steerer, Particle Accelerator Conference, May 17-20, Washington, 1993



### Abschn. 3

- [Bj 83] J.D. Bjorken and S.K. Mtingwa, "Intrabeam Scattering", Particle Accelerators, Vol. 13, p. 115, (1983)
- [Br 75] D. Broussard, *CERN LABIL/RF/INT/75-2* (1975)
- [Le 85] J. LeDuff, "Current and Current Density Limitations in Existing Electron Storage Rings", Nucl. Instr. Meth. **A239** (1985) 83
- [Sa 70] M. Sands, SLAC-121 (1970), Stanford
- [Wa 80] J.M. Wang and C. Pellegrini, "On the Condition for a Single Bunch High Frequency Fast Blow Up", Proc. 11th Int. Conf. on High Energy Acc., Geneva, p. 554, (1980)
- [Zi 86] M.S. Zisman, S. Chattopadhyay and J.J. Bisognano, "ZAP Manual", LBL-21270 (1986)

### Abschn. 5

- [CA 90] CAS, CERN Accelerator School, Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, CERN 90-03, Geneva, 1990.
- [Ei 92] D. Einfeld and M. Plesko, A Modified QBA-Optics for Low Emittance Storage Rings, FZR 92-15, Rossendorf, Nov. 1992
- [Wi 91] H. Wiedemann, Storage Ring Optimization, Handbook on Synchrotron Radiation, Vol.3, North Holland Publ., Amsterdam, 1991.

### Abschn. 6

- [Al 86] 1-2 GeV Synchrotron Radiation Source  
Conceptual Design Report July 1986  
Lawrence Berkeley Laboratory
- [An 87] Yu. G. Alenitzkij, H. Guratzsch, N. L. Saplatin, S. Preusche,  
H. Tyrroff, S. I. Tschesnova  
Auswahl der Shims für das Zyklotron U-120 im Induktionsbereich  
zwischen 1 und 1,45 T, Dubna Report 9-87-491, (1987)
- [AP 87] 7-GeV Advanced Photon Source, Conceptual Design Report,  
ANL-87-15, Argonne Illinois, (1987)
- [Ei 92a] D. Einfeld and M. Plesko  
A Modified QBA Optics for Low Emittance Storage Ring  
FZR 92-15, Rossendorf 1992 und  
Contribution to Particle Accelerator Conference 93, Washington  
D. C. , 17-20 May 1993
- [Ei 92b] D. Einfeld und H.U. Gersch  
Bericht über Rechnungen zu den Ablenkmagneten des Projekts  
ROSY, Interner Bericht FZR, Rossendorf, (1992)

- [Ei 93a] D. Einfeld, H. Büttig, S. Dienel, W. Gläser, Th. Götz, H. Guratzsch, B. Hartmann, D. Janssen, H. Krug, J. Linnemann, W. Matz, J. B. Murphy, W. Neumann, W. O. , M. Picard, M. Plesko, D. Pröhl, R. Rossmanith, R. Schlenk, D. Tomassini, H. Tyrroff  
The Synchrotron Light Source ROSY,  
Contribution to PAC 93, Washington D. C. ,17-20 May 1993
- [Ei 93b] D. Einfeld und A. Krüssel, Optimierung der Strahlableitmagnete des Projekts ROSY, Interner Bericht FHO Emden (1993)
- [EL 89] ELETTRA, Conceptual Design Report, Sincrotrone Trieste, Pariciono 99-34012 Triest, Italy
- [Ja 93] A. Jackson, Commissioning and Performance of the Advanced Light Source, PAC 93, Washington D. C. ,17-20 May 1993
- [Li 92] M. Lieuvin, A Ropert, L. Farvaeque  
ESRF- The Storage Ring Magnet,  
EPAC '92, Berlin (1992)
- [Li 93] M. Lieuvin, ESRF, pers. Mitteilung zum Polprofil
- [Ke 93] R. Keller, Final Analysis for the ALS Lattice Magnet Data, IEEE 1993 PAC , Washington D. C. ,17-20 May 1993
- [Pe 93] G. Petrucci, D. Tommasini; The ELETTRA Storage Ring Magnets, IEEE 1993 Particle Accelerator Conference, Washington D. C. ,17-20 May 1993
- [PO 87] Users Guide for the POISSON/SUPERFISH Group of Codes, LA-UR-87-115, (1987)
- [Ro 90] A. Ropert, Results of Magnetic Measurements of Storage Ring Quadrupole Prototypes, ESRF-SR/LAT -90-25
- [Sw 93] H. Schweickert, KfK-Karlsruhe GmbH, pers. Mittlg. zum Polprofil
- [Ta 93] J. Tanabe, Lawrence Berkeley Laboratory, Advanced Light Source, pers. Mitteilung zum Polprofil
- [Ta 93a] J. Tanabe, Magnet Costs for the Advanced Light Source, PAC '93, Washington D. C. ,17-20 May 1993
- [To 93] D. Tommasini, Sincrotrone Trieste, pers. Mittlg. zum Polprofil
- [Ty 91] H. Tyrroff, H. Danared, L. Liljeby, Gun Optimization for an Electron Beam Ion Source, NIM A **301**, (1991), 591-593
- [Wa 91] R.P. Walker, Harmonic Field Analysis in the ELETTRA Bending Magnet, Sincrotrone Trieste, ST/M-TN-91/5, (1991)
- [Wa 93] R. Walker, D. Zagrando, Measurement and Correction of the ELETTRA Storage Ring Dipole Magnets, PAC 93, Washington D. C. , May 17-20 1993
- [Wr 93] Sincrotrone Trieste, ESRF-Workshop, Grenoble, Oct. 19-20, 1993
- [Za 93] D. Zangrode, R. Walker, Magnetic Measurements and Alignment of the ELETTRA-Storage-Ring Quadrupole, Sextupole and Steerer  
PAC 93, Washington D. C. , May 17-20 1993

## Abschn. 7

- [Br 93] J.F. Bridges, Y.W. Kang, R.L. Kustom, K. Primdahl, High Power Testing of the Prototype Acc. Cavity (352 MHz) for the APS, IEEE PAC 93, Washington (1993)
- [El 89] Elettra, Conceptional Design Report, Sincrotrone Trieste (1989)
- [Fo 91] Ch. Fox, Dämpfung höherer Moden in den 52 MHz Resonatoren des HERA Speicherringes, DESY HERA 91-18, (1991)
- [Ha 93] S. Hanssen, LEP/CERN, private Mitteilung
- [Ja 92] J. Jacob, C. David, J.-L. Revol, G. Gautier, D. Vial, P. Barbier, D. Bilot, J.M. Rigal, Commissioning and Operation of Two Storage Ring RF Accelerating Units at the ESRF, EPAC 92, Berlin (1992)
- [Ko 90] R.D. Kohaupt, Landau Damping, CERN Acc. School, CERN 90-04
- [La 93] J.L. Laclaire, private Mitteilung
- [Ta 93] B. Taylor, C.C. Lo, K. Baptiste, J. Guigli, J. Julian, The ALS Storage Ring System, LBL-33291 (1993)
- [We 93] E. Wehreter, private Mitteilung
- [Wi 92] K. Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Teubner Stuttgart, 1992
- [Wil 89] I. Wilson and H. Henke, The LEP Main Accelerating Structure, CERN 89-09, (1989)
- [Ws 78] P.B. Wilson, Transient Beam Loading in Electron-Positron Storage Rings, CERN-ISR-TH/78-23, (1978)

## Abschn. 8

- [De 92] DESY - Anlagen der Senderstromversorgung
- [Ri 90] R. Richter ELETTRA Technical Specification PS 2/90

## Abschn. 9

- [Ba 90] R. Ballion, J. Boster, W. Giesske, H. Hartwig, D. Jagnow, R. Kose, J. Kouptsidis, G. Schumann und M. Schwartz, DESY, The vacuum system of the HERA electron storage ring Vacuum, volume 41, Nr 7 - 9, S. 1887 - 1889
- [Be 91] BESSY II, Technische Studie, Berlin 1991
- [De 93] DESY, mündliche Mitteilungen der Abt. MVA, 1993
- [Es 87] ESRF, Foundation Phase Report, Genoble 2/87
- [Gr 91] F. Grotelüschen, Das Ultra-Hochvakuumsystem bei DESY Vakuum in der Praxis (1991), Nr. 4, S. 266 - 273
- [Is 92] H. Ishimaru, K. Tatenuma, T. Momose, Quick acquisition of UHV by removing adsorbed water using chemical reaction instead of a baking, Manuskript, 1992, Nat. Lab. for High Energy Physics, Tsukuba, Ibaraki, Japan

[Wu 88] M. Wutz , H. Adam, W. Walcher , Theorie und Praxis der Vakuumtechnik, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1988

#### Absch. 10

- [BE 89] BESSY II - Eine optimierte Undulator / Wiggler-Speicherring-Lichtquelle für den UV- und XUV-Spektralbereich, 2. Teil: Technische Studie, Berlin (Juni 1989)
- [De 75] Design study for a dedicated source of synchrotron radiation, Daresbury Laboratory, Report - DL/SRF/R2 (1975)
- [Eg 83] G.v. Egan-Krieger, D. Einfeld, W.-D. Klotz, H. Lehr, R. Maier, G. Mühlhaupt, R. Richter and E. Wehreter, Performance of the 800-MeV injector for the BESSY storage ring, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-30** (1983) 3103
- [Ga 79] J. Galayda, L. Blumberg, R. Heese, J. Schuchman, S. Krinsky and A. Steenbergen, The NSLS booster synchrotron, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-26** (1979) 3839
- [IM 91] Vorschlag für den Bau einer Synchrotronlichtquelle in Mainz 1. Teil, Technische Auslegung, IMM Institut für Mikrotechnik GmbH, Mainz (Juni 1991)
- [Su 78] V.P. Suller and D.J. Thompson, Nucl. Instr. Meth. **152** (1978) 1
- [Th 80] D.J. Thompson, Nucl. Instr. Meth. **177** (1980) 27

#### Abschn. 11

- [Bi 89] R. Biscardi et al., Switched Detector for Beam Position Monitor, Proc. 1989 US Particle Accelerator Conference, Chicago
- [Br 88] S. Brinkmann et al., 'Design Study of the Beam Position Monitor for the ESRF', Universität Dortmund, (Dez. 1988)
- [De 93] DESY, Mündliche Mitteilungen der Abt. MVA, 1993
- [El 89] ELETTRA Conceptual Design Report, Sinchrotrone Trieste (April 1989)
- [Hi 89] J. Hinkson et al., 'Advanced Light Source (ALS) Beam Position Monitor', Proc. 1989 US Particle Accelerator Conference, Chicago
- [Un 81] K. Unser, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-28**, 2344.

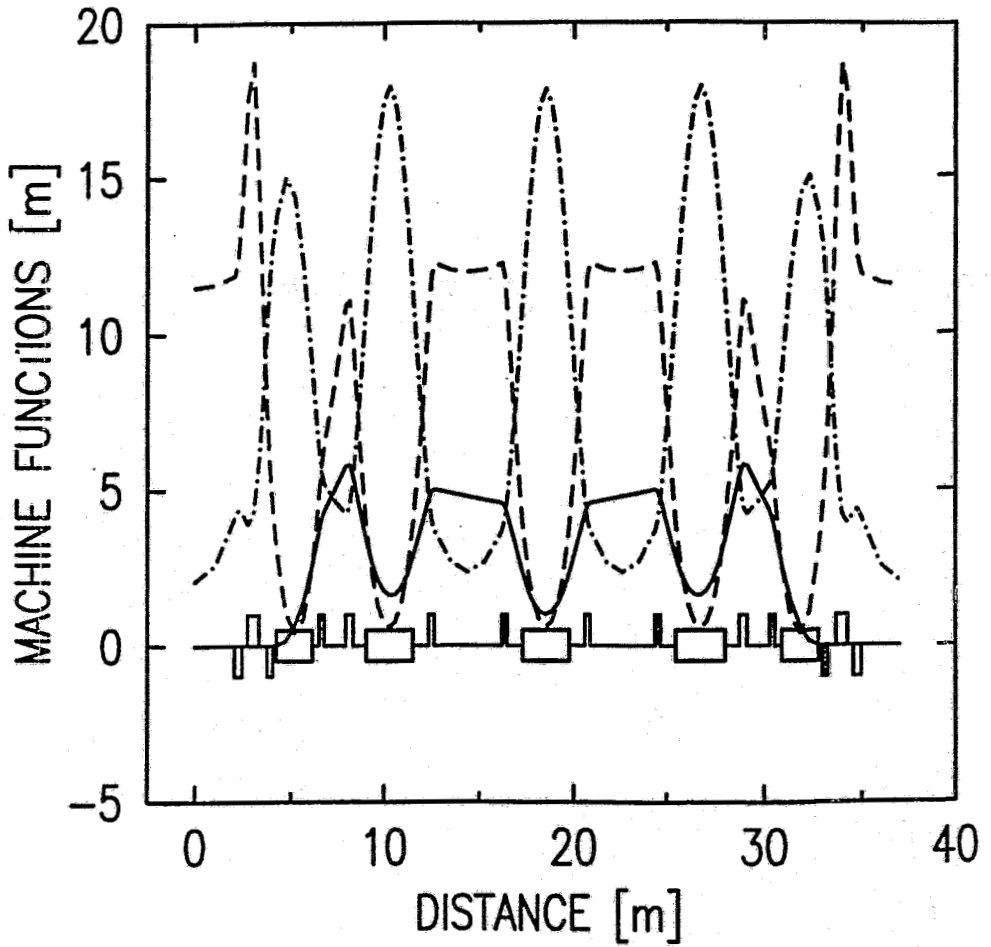
#### Abschn. 12

- [Cr 89] M.Crowley-Milling, D.P.Gurd (editors), Accelerator and large experimental physics control systems, Proceedings of the International Conference , Vancouver, BC, Canada, October 30 - November 3, 1989, North Holland

- [Go 90] Th. Götz, Vollautomatische Messung des ELSA-Arbeitspunktes mit EPOS,  
Physikalisches Institut der Universität Bonn, BONN-IR-90-50
- [Go 91] A. Goscinski, Distributed Operating Systems - The logical design, Addison-Wesley Publ.Comp. 1991
- [Go 93] T. Goetz, M. Picard Physikalisches Institut der Universität Bonn, Nußallee 12, 5300 Bonn 1, Germany  
M. Plesko Sincrotrone Trieste, Padriciano 99, 34012 Trieste, Italy  
Das ROSY-Kontrollsystem Conceptual Design Report  
28. Juni 1993
- [Pa 93] Th. Götz, M. Picard, M. Plesko, The control system of ROSY I, Particle Accelerator Conference, Washington, May 17-20 1993
- [Pi 91] M. Picard, Die Messung des transversalen Phasenraumes mit EPOS,  
Physikalisches Institut der Universität Bonn, BONN IR 1991
- [Po 91] F. Potepan, The ELETTRA Man Machine Interface, Sincrotrone Trieste Bericht ST/M-91/2, März 1991
- [Su 92] G. Surace, CPE, a New Way of Programming, Sincrotrone Trieste Bericht ST/M -92/1, Januar 1992
- [Su 93] G. Surace, Control Panel Editor - Developer's Guide, Sincrotrone Trieste Bericht ST/M-93/6, Juni 1993
- [VxKer] J. Fogelin, The VxWorks Real-Time Kernel, Wind River Systems Inc., 1010 Atlantic Ave., Alameda, CA 94501

**Anhang II.A: Eingabedaten und Lösungen für die Optiken  
ROSY A, ROSY B und ROSY C**

# ROSY A



$E = 3.000$	$\alpha = .661E-02$	— $10\eta_x$
$N_s = 4$	$\epsilon = .285E-07$	- - - $\beta$
$\nu_x = 8.840$	$\xi_x = -18.47$	- · - $\beta^x$
$\nu_y = 4.748$	$\xi_y = -11.14$	

murphy, rosyafull.out, Apr 13 1993 14:50:13

rosyafull.dat: version A of rosy 7 april 1993

ENERGY (MEV) 3000.  
B\*RO (TESLA\*METERS) 10.0  
TOTAL BENDING ANGLE/2PI 0.100000140D+01  
NUMBER OF PERIODS 4  
PERIOD LENGTH (m) 0.370280166D+02  
TOTAL LENGTH (m) 0.148112066D+03  
REV. FREQUENCY (MHZ) 0.202409206D+01  
HARMONIC NUMBER 0.174000000D+03  
RF FREQUENCY (MHZ) 0.352192019D+03

ACHIEVED CONVERGENCE = 0.611925503D-01

FULL-PERIOD LATTICE : NO REFLECTED SYMMETRY

TYPE	LENGTH	K2(M-2)	RADIUS
1 O	0.206000000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
2 QD	0.400000000D+00	0.100106400D+01	0.000000000D+00
3 O	0.300000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
4 QF	0.600000000D+00	0.163891100D+01	0.000000000D+00
5 O	0.420000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
6 QD	0.280000000D+00	0.130046100D+01	0.000000000D+00
7 O	0.200000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
8 A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
9 B	0.187126610D+01	0.144399071D+02	0.714770000D+01
10 A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
11 O	0.350000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
12 SD	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
13 QF	0.280000000D+00	0.163900100D+01	0.000000000D+00
14 O	0.115125000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
15 SF	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
16 QF	0.400000000D+00	0.175380200D+01	0.000000000D+00
17 O	0.720000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
18 A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
19 B	0.124751073D+01	0.144399071D+02	0.714770000D+01
20 B	0.124751073D+01	0.144399071D+02	0.714770000D+01
21 A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
22 O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
23 QF	0.280000000D+00	0.173411600D+01	0.000000000D+00
24 O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
25 O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
26 QF	0.280000000D+00	0.173411600D+01	0.000000000D+00
27 O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
28 A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
29 B	0.124751073D+01	0.144399071D+02	0.714770000D+01
30 B	0.124751073D+01	0.144399071D+02	0.714770000D+01
31 A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
32 O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
33 QF	0.280000000D+00	0.173411600D+01	0.000000000D+00
34 O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
35 O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
36 QF	0.280000000D+00	0.173411600D+01	0.000000000D+00
37 O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
38 A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
39 B	0.124751073D+01	0.144399071D+02	0.714770000D+01
40 B	0.124751073D+01	0.144399071D+02	0.714770000D+01
41 A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01

- 1 -



42	O	0.720000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
43	QF	0.400000000D+00	0.175380200D+01	0.000000000D+00
44	SF	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
45	O	0.115125000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
46	QF	0.280000000D+00	0.163900100D+01	0.000000000D+00
47	SD	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
48	O	0.350000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
49	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
50	B	0.187126610D+01	0.144399071D+02	0.714770000D+01
51	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
52	O	0.200000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
53	QD	0.280000000D+00	0.130046100D+01	0.000000000D+00
54	O	0.420000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
55	QF	0.600000000D+00	0.163891100D+01	0.000000000D+00
56	O	0.300000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
57	QD	0.400000000D+00	0.100106400D+01	0.000000000D+00
58	O	0.206000000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00

1

rosyafull.dat: version A of rosy 7 april 1993

PARAMETERS

QX - QZ	8.840	4.748
tunes/period	2.210	1.187

ETA0 - BX0 - BZ0	0.4206E-04	11.50	2.100
ETAMAX - BXMAX - BZMAX	0.5809	18.94	17.92
ETAMIN - BXMIN - BZMIN	0.2000E-04	0.4089	2.100
<ETA> - <BX> - <BZ>	0.2571	7.682	7.876

SYNCHROTRON RADIATION INTEGRALS (R.H.HELM et al.) :

I1 (meters)	0.978900805D+00
I2 (1/meters)	0.879051174D+00
I3 (1/meters**2)	0.122983781D+00
I4 (1/meters)	-0.553350680D+00
I5 (1/meters)	0.307925864D-02

MOM. COMPACTION	0.6609E-02		
ENERGY LOSS/TURN (KeV)	1002.		
D	-.6295		
JS, JX, JZ	1.371	1.629	1.000
DAMPINGS (ms)	2.158	1.815	2.957
REL. R.M.S. ENERGY-SPREAD	0.1162E-02		
EMITTANCE(m-rad)	0.2845E-07		

1

BEAM PAR & dn/dt FOR T=293K - P=1nTorr - Z(biatomic)=8

VRF(KV)	3446.
F SYNC. (KHZ)	28.71
NAT.BUNCH LENGTH(m)	0.1277E-01
RF ACCEPTANCE	0.1930E-01

CHROMATICITIES (M.BASSETTI LEP NOTE 504)

BENDING	1.664	-15.50
EDGE	0.2493	-.7923
QUADRUPOLE	-20.39	5.147
TOTAL CROM.	-18.47	-11.14

TRANSFER MATRIX FOR ONE FULL PERIOD

0.248952118D+00	0.111388478D+02	0.315873731D-04
-0.842118373D-01	0.248952118D+00	0.354175918D-05
0.385683788D+00	0.193757155D+01	

- 2 -

```

-0.439337589D+00    0.385683788D+00
COR. TOT. CROM.    2.400    4.000
SEXTUPOLES INTEGRAL
  1  0.000000000D+00    0.654624965D-01    0.155444468D+00
  2  0.000000000D+00    0.225614718D+00    0.163395224D+00
  3  0.000000000D+00    0.225614718D+00    0.163395224D+00
  4  0.000000000D+00    0.654624965D-01    0.155444468D+00
SEXT (T/M^2)==>(IF L=0 then LSEXT=1 meter)
SD = -226.9
SF = 118.2

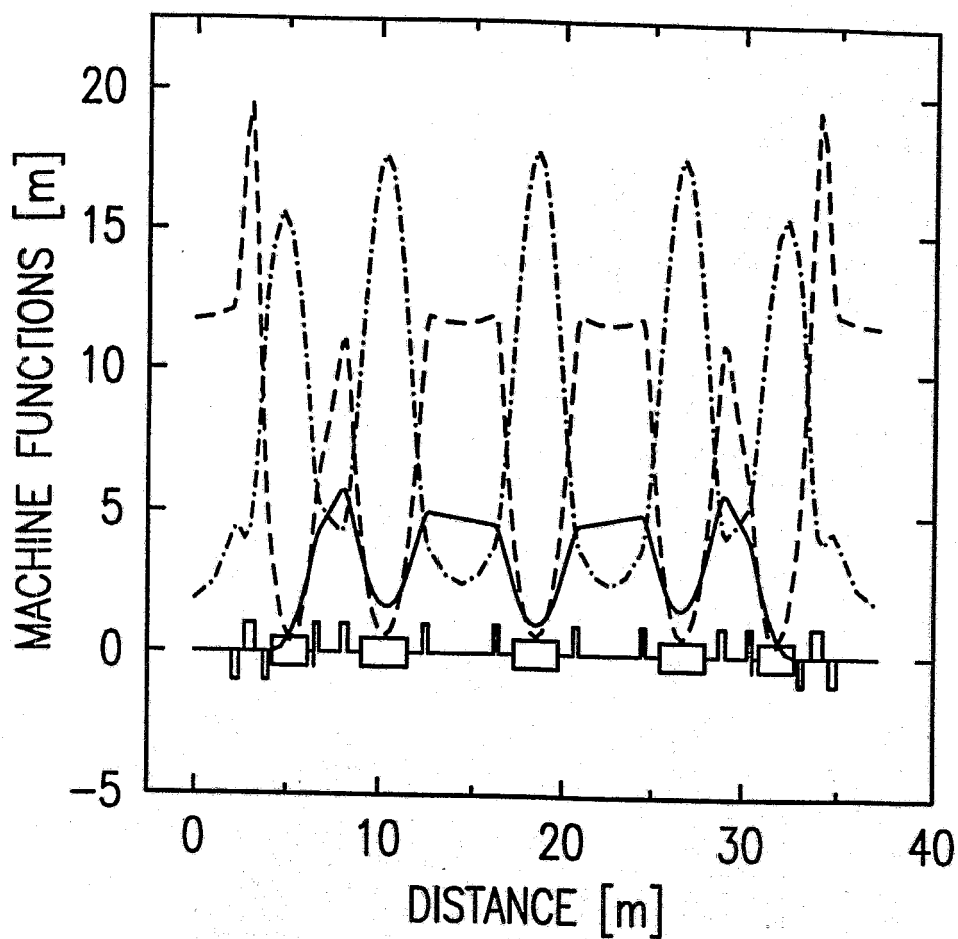
```

1  
rosyafull.dat: version A of rosy 7 april 1993

	METERS	ETA	BETAX	BETAZ	PHX	PHZ
O	0.	0.4206E-04	11.50	2.100	0.	0.
O	1.030	0.4206E-04	11.59	2.605	5.118	26.13
O	2.060	0.4206E-04	11.87	4.121	10.15	44.45
QD	2.260	0.4290E-04	12.43	4.359	11.10	47.14
QD	2.460	0.4547E-04	14.05	4.271	11.98	49.77
O	2.610	0.4807E-04	15.77	4.091	12.56	51.83
O	2.760	0.5066E-04	17.59	3.925	13.07	53.98
QF	3.060	0.5203E-04	18.70	4.215	14.00	58.31
QF	3.360	0.4582E-04	14.63	5.962	15.01	61.83
O	3.570	0.3897E-04	10.68	8.042	15.97	63.56
O	3.780	0.3212E-04	7.361	10.44	17.33	64.88
QD	3.920	0.2794E-04	5.651	11.93	18.58	65.59
QD	4.060	0.2448E-04	4.424	12.88	20.19	66.24
O	4.160	0.2224E-04	3.721	13.35	21.60	66.67
O	4.260	0.2000E-04	3.083	13.83	23.29	67.10
A	4.260	0.2000E-04	3.083	13.83	23.29	67.10
B	5.196	0.6242E-01	0.4089	14.41	83.23	70.74
B	6.131	0.2643	2.613	8.817	153.4	75.31
A	6.131	0.2643	2.613	8.817	153.4	75.31
O	6.306	0.3183	3.651	7.462	156.6	76.55
O	6.481	0.3724	4.882	6.227	159.0	78.02
SD	6.481	0.3724	4.882	6.227	159.0	78.02
QF	6.621	0.4094	5.828	5.508	160.5	79.39
QF	6.761	0.4333	6.465	5.178	161.8	80.90
O	7.337	0.5035	8.509	4.630	166.2	87.66
O	7.913	0.5736	10.92	4.249	169.7	95.11
SF	7.913	0.5736	10.92	4.249	169.7	95.11
QF	8.113	0.5777	11.06	4.456	170.7	97.78
QF	8.313	0.5415	9.702	5.353	171.8	100.2
O	8.673	0.4412	6.438	7.993	174.4	103.3
O	9.033	0.3408	3.874	11.20	178.5	105.5
A	9.033	0.3408	3.874	11.20	178.5	105.5
B	9.656	0.2144	1.335	16.04	194.7	108.1
B	10.28	0.1650	0.5928	17.92	240.2	110.2
B	10.90	0.1875	1.335	16.04	285.7	112.2
B	11.53	0.2843	3.874	11.20	301.9	114.9
A	11.53	0.2843	3.874	11.20	301.9	114.9
O	11.94	0.3769	6.850	7.598	306.5	117.4
O	12.35	0.4696	10.73	4.726	309.2	121.3
QF	12.49	0.4931	11.87	4.057	309.9	123.2
QF	12.63	0.4999	12.24	3.707	310.6	125.3
O	13.51	0.4891	12.05	2.716	314.8	141.4
O	14.40	0.4784	11.98	2.382	319.0	161.8
O	15.28	0.4677	12.05	2.705	323.2	182.2
O	16.17	0.4570	12.24	3.685	327.4	198.5
QF	16.31	0.4476	11.87	4.032	328.1	200.6

QF	16.45	0.4230	10.73	4.697	328.8	202.4
O	16.86	0.3294	6.850	7.551	331.5	206.4
O	17.27	0.2359	3.874	11.14	336.1	208.9
A	17.27	0.2359	3.874	11.14	336.1	208.9
B	17.89	0.1344	1.335	15.95	352.3	211.6
B	18.51	0.1017	0.5928	17.81	397.8	213.7
B	19.14	0.1344	1.335	15.95	443.3	215.7
B	19.76	0.2359	3.874	11.14	459.5	218.4
A	19.76	0.2359	3.874	11.14	459.5	218.4
O	20.17	0.3294	6.850	7.551	464.1	220.9
O	20.58	0.4230	10.73	4.697	466.8	224.9
QF	20.72	0.4476	11.87	4.032	467.5	226.7
QF	20.86	0.4570	12.24	3.685	468.2	228.8
O	21.75	0.4677	12.05	2.705	472.3	245.1
O	22.63	0.4784	11.98	2.382	476.6	265.5
O	23.52	0.4891	12.05	2.716	480.8	285.9
O	24.40	0.4999	12.24	3.707	485.0	302.1
QF	24.54	0.4931	11.87	4.057	485.6	304.1
QF	24.68	0.4696	10.73	4.726	486.3	306.0
O	25.09	0.3769	6.850	7.598	489.1	309.9
O	25.50	0.2843	3.874	11.20	493.6	312.4
A	25.50	0.2843	3.874	11.20	493.6	312.4
B	26.12	0.1875	1.335	16.04	509.8	315.1
B	26.75	0.1650	0.5928	17.92	555.3	317.1
B	27.37	0.2144	1.335	16.04	600.9	319.2
B	28.00	0.3408	3.874	11.20	617.1	321.8
A	28.00	0.3408	3.874	11.20	617.1	321.8
O	28.36	0.4412	6.438	7.993	621.2	324.0
O	28.72	0.5415	9.702	5.353	623.8	327.2
QF	28.92	0.5777	11.06	4.456	624.9	329.5
QF	29.12	0.5736	10.92	4.249	625.9	332.2
SF	29.12	0.5736	10.92	4.249	625.9	332.2
O	29.69	0.5035	8.509	4.630	629.3	339.7
O	30.27	0.4333	6.465	5.178	633.8	346.4
QF	30.41	0.4094	5.828	5.508	635.1	347.9
QF	30.55	0.3724	4.882	6.227	636.6	349.3
SD	30.55	0.3724	4.882	6.227	636.6	349.3
O	30.72	0.3183	3.651	7.462	639.0	350.8
O	30.90	0.2643	2.613	8.817	642.2	352.0
A	30.90	0.2643	2.613	8.817	642.2	352.0
B	31.83	0.6242E-01	0.4089	14.41	712.3	356.6
B	32.77	0.2000E-04	3.083	13.83	772.3	360.2
A	32.77	0.2000E-04	3.083	13.83	772.3	360.2
O	32.87	0.2224E-04	3.721	13.35	774.0	360.6
O	32.97	0.2448E-04	4.424	12.88	775.4	361.1
QD	33.11	0.2794E-04	5.651	11.93	777.0	361.7
QD	33.25	0.3212E-04	7.361	10.44	778.2	362.4
O	33.46	0.3897E-04	10.68	8.042	779.6	363.7
O	33.67	0.4582E-04	14.63	5.962	780.6	365.5
QF	33.97	0.5203E-04	18.70	4.215	781.6	369.0
QF	34.27	0.5066E-04	17.59	3.925	782.5	373.3
O	34.42	0.4807E-04	15.77	4.091	783.0	375.5
O	34.57	0.4547E-04	14.05	4.271	783.6	377.5
QD	34.77	0.4290E-04	12.43	4.359	784.5	380.2
QD	34.97	0.4206E-04	11.87	4.121	785.4	382.9
O	36.00	0.4206E-04	11.59	2.605	790.5	401.2
O	37.03	0.4206E-04	11.50	2.100	795.6	427.3

# ROSY B



$E = 3.000$	$\alpha = .659E-02$	— $10\eta_x$
$N_s = 4$	$\epsilon = .282E-07$	- - - $\beta$
$\nu_x = 8.833$	$\xi_x = -18.60$	- · - · $\beta_y^x$
$\nu_y = 4.759$	$\xi_y = -11.27$	

murphy, rosybfull.out, Apr 7 1993 09:47:19

rosybfull.dat: version B of rosy 7 april 1993

ENERGY (MEV) 3000.  
B\*R0 (TESLA\*METERS) 10.0  
TOTAL BENDING ANGLE/2PI 0.100000140D+01  
NUMBER OF PERIODS 4  
PERIOD LENGTH (m) 0.370280166D+02  
TOTAL LENGTH (m) 0.148112066D+03  
REV. FREQUENCY (MHZ) 0.202409206D+01  
HARMONIC NUMBER 0.174000000D+03  
RF FREQUENCY (MHZ) 0.352192019D+03

ACHIEVED CONVERGENCE = 0.636371342D-01

FULL-PERIOD LATTICE : NO REFLECTED SYMMETRY

	TYPE	LENGTH	K2(M-2)	RADIUS
1	O	0.206000000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
2	QD	0.400000000D+00	0.104925200D+01	0.000000000D+00
3	O	0.300000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
4	QF	0.600000000D+00	0.166694750D+01	0.000000000D+00
5	O	0.420000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
6	QD	0.280000000D+00	0.135273500D+01	0.000000000D+00
7	O	0.200000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
8	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
9	B	0.187126610D+01	0.143500402D+02	0.714770000D+01
10	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
11	O	0.350000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
12	SD	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
13	QF	0.280000000D+00	0.166314400D+01	0.000000000D+00
14	O	0.115125000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
15	SF	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
16	QF	0.400000000D+00	0.174556300D+01	0.000000000D+00
17	O	0.720000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
18	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
19	B	0.124751073D+01	0.143500402D+02	0.714770000D+01
20	B	0.124751073D+01	0.143500402D+02	0.714770000D+01
21	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
22	O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
23	QF	0.280000000D+00	0.173355600D+01	0.000000000D+00
24	O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
25	O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
26	QF	0.280000000D+00	0.173355600D+01	0.000000000D+00
27	O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
28	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
29	B	0.124751073D+01	0.143500402D+02	0.714770000D+01
30	B	0.124751073D+01	0.143500402D+02	0.714770000D+01
31	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
32	O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
33	QF	0.280000000D+00	0.173355600D+01	0.000000000D+00
34	O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
35	O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
36	QF	0.280000000D+00	0.173355600D+01	0.000000000D+00
37	O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
38	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
39	B	0.124751073D+01	0.143500402D+02	0.714770000D+01
40	B	0.124751073D+01	0.143500402D+02	0.714770000D+01
41	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01

- 1 -

42	O	0.720000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
43	QF	0.400000000D+00	0.174556300D+01	0.000000000D+00
44	SF	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
45	O	0.115125000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
46	QF	0.280000000D+00	0.166314400D+01	0.000000000D+00
47	SD	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
48	O	0.350000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
49	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
50	B	0.187126610D+01	0.143500402D+02	0.714770000D+01
51	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
52	O	0.200000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
53	QD	0.280000000D+00	0.135273500D+01	0.000000000D+00
54	O	0.420000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
55	QF	0.600000000D+00	0.166694750D+01	0.000000000D+00
56	O	0.300000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
57	QD	0.400000000D+00	0.104925200D+01	0.000000000D+00
58	O	0.206000000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00

1

rosybfull.dat: version B of rosy 7 april 1993

PARAMETERS

QX - QZ	8.833	4.759
tunes/period	2.208	1.190

ETA0 - BX0 - BZ0	0.4014E-04	11.72	1.872
ETAMAX - BKMAX - BZMAX	0.5767	19.67	17.89
ETAMIN - BXMIN - BZMIN	0.1928E-04	0.4036	1.872
<ETA> - <BX> - <BZ>	0.2567	7.672	7.935

SYNCHROTRON RADIATION INTEGRALS (R.H.HELM et al.) :

I1 (meters)	0.976586989D+00
I2 (1/meters)	0.879051174D+00
I3 (1/meters**2)	0.122983781D+00
I4 (1/meters)	-0.548607089D+00
I5 (1/meters)	0.304030400D-02

MOM. COMPACTION	0.6594E-02		
ENERGY LOSS/TURN (KeV)	1002.		
D	-.6241		
JS, JX, JZ	1.376	1.624	1.000
DAMPINGS(ms)	2.149	1.821	2.957
REL. R.M.S. ENERGY-SPREAD	0.1160E-02		
EMITTANCE(m-rad)	0.2818E-07		

1

BEAM PAR & dN/dt FOR T=293K - P=1nTorr - Z(biatomic)=8

VRF (KV)	1203.
F SYNC. (KHZ)	12.86
NAT. BUNCH LENGTH(m)	0.2834E-01
AN. BUNCH LENGTH(m)	0.8106E-01
RF ACCEPTANCE	0.3794E-02
HOR. APERTURE (m)	0.2700E-01
VER. APERTURE (m)	0.1500E-01
P=1 nTorr - T=293K - Z=8 (Biatomic)	
AV.CURRENT/BUNCH(mA)	141.0
PEAK CURRENT/BUNCH(A)	102.8
# ELECTRONS/BUNCH	0.434836868D+12
EMITTANCE COUPL.	0.1000
QUANTUM LIFE (hrs)-SANDS	0.8778E-06
LIFETIME GB (min)	1628.
LIFETIME SC (min)	9439.
LIFETIME GBe (min)	0.1002E+05
LIFETIME S Ce (min)	0.4088E+05

- 2 -

TOUSCHEK (min) 59.48  
 LIFETIME TOT.(min) 0.5267E-04

1

CHROMATICITIES (M.BASSETTI LEP NOTE 504)  
 BENDING 1.649 -15.49  
 EDGE 0.2480 -.7997  
 QUADRUPOLE -20.50 5.024  
 TOTAL CROM. -18.60 -11.27

TRANSFER MATRIX FOR ONE FULL PERIOD

0.259319880D+00	0.113221139D+02	0.297292348D-04
-0.823833087D-01	0.259319880D+00	0.330668079D-05
0.370146186D+00	0.173908816D+01	
-0.496232349D+00	0.370146186D+00	
COR.TOT.CROM. 2.400	4.000	
SEXTUPOLES INTEGRAL		
1 0.000000000D+00	0.653146986D-01	0.157982823D+00
2 0.000000000D+00	0.223466411D+00	0.162458041D+00
3 0.000000000D+00	0.223466411D+00	0.162458041D+00
4 0.000000000D+00	0.653146986D-01	0.157982823D+00

SEXT (T/M^2)==>(IF L=0 then LSEXT=1 meter)  
 SD = -223.6  
 SF = 118.6

1

rosybfull.dat: version B of rosy 7 april 1993

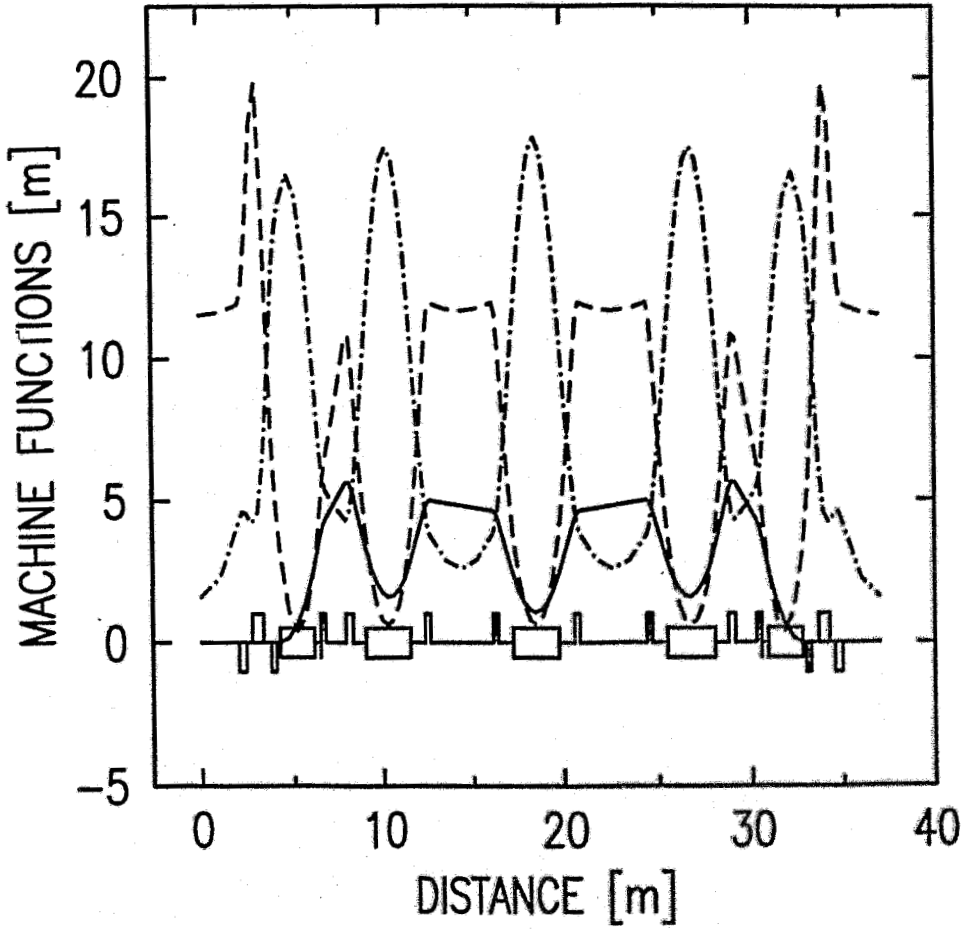
	METERS	ETA	BETAX	BETAZ	PHX	PHZ
O	0.	0.4014E-04	11.72	1.872	0.	0.
O	1.030	0.4014E-04	11.81	2.439	5.021	28.82
O	2.060	0.4014E-04	12.09	4.139	9.966	47.74
QD	2.260	0.4098E-04	12.68	4.417	10.90	50.40
QD	2.460	0.4355E-04	14.40	4.348	11.75	53.00
O	2.610	0.4615E-04	16.24	4.173	12.31	55.01
O	2.760	0.4875E-04	18.19	4.012	12.81	57.12
QF	3.060	0.5021E-04	19.43	4.335	13.71	61.35
QF	3.360	0.4422E-04	15.21	6.186	14.68	64.75
O	3.570	0.3758E-04	11.08	8.390	15.61	66.42
O	3.780	0.3093E-04	7.607	10.94	16.92	67.68
QD	3.920	0.2689E-04	5.827	12.51	18.13	68.36
QD	4.060	0.2357E-04	4.560	13.50	19.69	68.97
O	4.160	0.2143E-04	3.836	13.97	21.06	69.39
O	4.260	0.1928E-04	3.180	14.45	22.70	69.79
A	4.260	0.1928E-04	3.180	14.45	22.70	69.79
B	5.196	0.6241E-01	0.4036	14.90	81.74	73.30
B	6.131	0.2642	2.591	9.035	153.6	77.74
A	6.131	0.2642	2.591	9.035	153.6	77.74
O	6.306	0.3182	3.633	7.627	156.9	78.95
O	6.481	0.3721	4.870	6.346	159.2	80.39
SD	6.481	0.3721	4.870	6.346	159.2	80.39
QF	6.621	0.4090	5.820	5.601	160.7	81.74
QF	6.761	0.4326	6.457	5.258	162.0	83.23
O	7.337	0.5011	8.488	4.677	166.5	89.89
O	7.913	0.5696	10.89	4.264	169.9	97.30
SF	7.913	0.5696	10.89	4.264	169.9	97.30
QF	8.113	0.5734	11.02	4.459	171.0	99.96
QF	8.313	0.5373	9.677	5.341	172.1	102.3
O	8.673	0.4377	6.438	7.938	174.7	105.5
O	9.033	0.3381	3.890	11.09	178.8	107.7

A	9.033	0.3381	3.890	11.09	178.8	107.7
B	9.656	0.2126	1.358	15.83	194.8	110.4
B	10.28	0.1638	0.6037	17.67	239.3	112.5
B	10.90	0.1868	1.310	15.83	284.8	114.6
B	11.53	0.2837	3.775	11.08	301.4	117.2
A	11.53	0.2837	3.775	11.08	301.4	117.2
O	11.94	0.3764	6.667	7.535	306.1	119.8
O	12.35	0.4691	10.44	4.708	308.9	123.7
QF	12.49	0.4926	11.55	4.050	309.6	125.6
QF	12.63	0.4994	11.91	3.710	310.3	127.6
O	13.51	0.4891	11.73	2.766	314.6	143.7
O	14.40	0.4787	11.68	2.459	318.9	163.5
O	15.28	0.4684	11.76	2.788	323.3	183.3
O	16.17	0.4580	11.98	3.754	327.5	199.1
QF	16.31	0.4486	11.62	4.099	328.2	201.2
QF	16.45	0.4240	10.51	4.766	328.9	203.0
O	16.86	0.3304	6.723	7.629	331.7	206.9
O	17.27	0.2369	3.817	11.22	336.4	209.4
A	17.27	0.2369	3.817	11.22	336.4	209.4
B	17.89	0.1354	1.334	16.02	352.7	212.1
B	18.51	0.1027	0.6080	17.89	397.5	214.1
B	19.14	0.1354	1.334	16.02	442.3	216.2
B	19.76	0.2369	3.817	11.22	458.6	218.8
A	19.76	0.2369	3.817	11.22	458.6	218.8
O	20.17	0.3304	6.723	7.629	463.2	221.4
O	20.58	0.4240	10.51	4.766	466.0	225.3
QF	20.72	0.4486	11.62	4.099	466.8	227.1
QF	20.86	0.4580	11.98	3.754	467.4	229.2
O	21.75	0.4684	11.76	2.788	471.7	245.0
O	22.63	0.4787	11.68	2.459	476.0	264.8
O	23.52	0.4891	11.73	2.766	480.4	284.6
O	24.40	0.4994	11.91	3.710	484.7	300.6
QF	24.54	0.4926	11.55	4.050	485.3	302.7
QF	24.68	0.4691	10.44	4.708	486.1	304.6
O	25.09	0.3764	6.667	7.535	488.9	308.5
O	25.50	0.2837	3.775	11.08	493.6	311.1
A	25.50	0.2837	3.775	11.08	493.6	311.1
B	26.12	0.1868	1.310	15.83	510.1	313.7
B	26.75	0.1638	0.6037	17.67	555.6	315.8
B	27.37	0.2126	1.358	15.83	600.1	317.9
B	28.00	0.3381	3.890	11.09	616.2	320.6
A	28.00	0.3381	3.890	11.09	616.2	320.6
O	28.36	0.4377	6.438	7.938	620.3	322.8
O	28.72	0.5373	9.677	5.341	622.9	325.9
QF	28.92	0.5734	11.02	4.459	624.0	328.3
QF	29.12	0.5696	10.89	4.264	625.0	331.0
SF	29.12	0.5696	10.89	4.264	625.0	331.0
O	29.69	0.5011	8.488	4.677	628.5	338.4
O	30.27	0.4326	6.457	5.258	632.9	345.0
QF	30.41	0.4090	5.820	5.601	634.2	346.5
QF	30.55	0.3721	4.870	6.346	635.7	347.9
SD	30.55	0.3721	4.870	6.346	635.7	347.9
O	30.72	0.3182	3.633	7.627	638.1	349.3
O	30.90	0.2642	2.591	9.035	641.4	350.5
A	30.90	0.2642	2.591	9.035	641.4	350.5
B	31.83	0.6241E-01	0.4036	14.90	713.2	355.0
B	32.77	0.1928E-04	3.180	14.45	772.3	358.5
A	32.77	0.1928E-04	3.180	14.45	772.3	358.5
O	32.87	0.2143E-04	3.836	13.97	773.9	358.9
O	32.97	0.2357E-04	4.560	13.50	775.3	359.3
QD	33.11	0.2689E-04	5.827	12.51	776.8	359.9
QD	33.25	0.3093E-04	7.607	10.94	778.0	360.6
O	33.46	0.3758E-04	11.08	8.390	779.4	361.9



O	33.67	0.4422E-04	15.21	6.186	780.3	363.5
QF	33.97	0.5021E-04	19.43	4.335	781.3	366.9
QF	34.27	0.4875E-04	18.19	4.012	782.1	371.2
O	34.42	0.4615E-04	16.24	4.173	782.6	373.3
O	34.57	0.4355E-04	14.40	4.348	783.2	375.3
QD	34.77	0.4098E-04	12.68	4.417	784.1	377.9
QD	34.97	0.4014E-04	12.09	4.139	785.0	380.5
O	36.00	0.4014E-04	11.81	2.439	789.9	399.5
O	37.03	0.4014E-04	11.72	1.872	795.0	428.3

# ROSY C



$E = 3.000$	$\alpha = .659E-02$	— $10\eta_x$
$N_s = 4$	$\epsilon = .280E-07$	- - - $\beta$
$\nu_x = 8.842$	$\xi_x = -18.76$	- · - · $\beta^x$
$\nu_y = 4.750$	$\xi_y = -11.48$	

murphy, rosycfull.out, Apr 7 1993 09:33:50

rosycfull.dat: version C of rosy 7 april 1993

ENERGY (MEV) 3000.  
B\*R0 (TESLA\*METERS) 10.0  
TOTAL BENDING ANGLE/2PI 0.100000140D+01  
NUMBER OF PERIODS 4  
PERIOD LENGTH (m) 0.370280166D+02  
TOTAL LENGTH (m) 0.148112066D+03  
REV. FREQUENCY (MHZ) 0.202409206D+01  
HARMONIC NUMBER 0.174000000D+03  
RF FREQUENCY (MHZ) 0.352192019D+03

ACHIEVED CONVERGENCE = 0.617057621D-01

FULL-PERIOD LATTICE : NO REFLECTED SYMMETRY

	TYPE	LENGTH	K2(M-2)	RADIUS
1	O	0.206000000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
2	QD	0.400000000D+00	0.112489500D+01	0.000000000D+00
3	O	0.300000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
4	QF	0.600000000D+00	0.171357500D+01	0.000000000D+00
5	O	0.420000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
6	QD	0.280000000D+00	0.142715500D+01	0.000000000D+00
7	O	0.200000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
8	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
9	B	0.187126610D+01	0.141999385D+02	0.714770000D+01
10	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
11	O	0.350000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
12	SD	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
13	QF	0.280000000D+00	0.171221600D+01	0.000000000D+00
14	O	0.115125000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
15	SF	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
16	QF	0.400000000D+00	0.172793000D+01	0.000000000D+00
17	O	0.720000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
18	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
19	B	0.124751073D+01	0.141999385D+02	0.714770000D+01
20	B	0.124751073D+01	0.141999385D+02	0.714770000D+01
21	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
22	O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
23	QF	0.280000000D+00	0.172953900D+01	0.000000000D+00
24	O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
25	O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
26	QF	0.280000000D+00	0.172953900D+01	0.000000000D+00
27	O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
28	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
29	B	0.124751073D+01	0.141999385D+02	0.714770000D+01
30	B	0.124751073D+01	0.141999385D+02	0.714770000D+01
31	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
32	O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
33	QF	0.280000000D+00	0.172953900D+01	0.000000000D+00
34	O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
35	O	0.176948000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
36	QF	0.280000000D+00	0.172953900D+01	0.000000000D+00
37	O	0.820000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
38	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01
39	B	0.124751073D+01	0.141999385D+02	0.714770000D+01
40	B	0.124751073D+01	0.141999385D+02	0.714770000D+01
41	A	0.000000000D+00	0.100000000D+02	0.714770000D+01

- 1 -

42	O	0.720000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
43	QF	0.400000000D+00	0.172793000D+01	0.000000000D+00
44	SF	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
45	O	0.115125000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00
46	QF	0.280000000D+00	0.171221600D+01	0.000000000D+00
47	SD	0.000000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
48	O	0.350000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
49	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
50	B	0.187126610D+01	0.141999385D+02	0.714770000D+01
51	A	0.000000000D+00	0.750000000D+01	0.714770000D+01
52	O	0.200000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
53	QD	0.280000000D+00	0.142715500D+01	0.000000000D+00
54	O	0.420000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
55	QF	0.600000000D+00	0.171357500D+01	0.000000000D+00
56	O	0.300000000D+00	0.000000000D+00	0.000000000D+00
57	QD	0.400000000D+00	0.112489500D+01	0.000000000D+00
58	O	0.206000000D+01	0.000000000D+00	0.000000000D+00

1

rosyfull.dat: version C of rosy 7 april 1993

PARAMETERS

QX - QZ	8.842	4.750	
tunes/period	2.211	1.188	
ETA0 - BX0 - BZ0	-.6798E-04	11.51	1.600
ETAMAX - BXMAX - BZMAX	0.5684	19.98	17.81
ETAMIN - BXMIN - BZMIN	-.8704E-04	0.3998	1.600
<ETA> - <BX> - <BZ>	0.2568	7.644	8.061

SYNCHROTRON RADIATION INTEGRALS (R.H.HELM et al.) :

I1 (meters)	0.976207249D+00
I2 (1/meters)	0.879051174D+00
I3 (1/meters**2)	0.122983781D+00
I4 (1/meters)	-0.542657557D+00
I5 (1/meters)	0.301099373D-02

MOM. COMPACTION	0.6591E-02		
ENERGY LOSS/TURN (KeV)	1002.		
D	-.6173		
JS, JX, JZ	1.383	1.617	1.000
DAMPINGS (ms)	2.139	1.828	2.957
REL. R.M.S. ENERGY-SPREAD	0.1157E-02		
EMITTANCE (m-rad)	0.2803E-07		

1

BEAM PAR & dn/dt FOR T=293K - P=1nTorr - Z(biatomic)=8

VRP (KV)	1203.
F SYNC. (KHZ)	12.87
NAT. BUNCH LENGTH (m)	0.2827E-01
AN. BUNCH LENGTH (m)	0.8084E-01
RF ACCEPTANCE	0.3795E-02
HOR. APERTURE (m)	0.2700E-01
VER. APERTURE (m)	0.1500E-01
P=1 nTorr - T=293K - Z=8 (Biatomic)	
AV. CURRENT/BUNCH (mA)	141.0
PEAK CURRENT/BUNCH (A)	103.1
# ELECTRONS/BUNCH	0.434836868D+12
EMITTANCE COUPL.	0.1000
QUANTUM LIFE (hrs)-SANDS	0.8719E-06
LIFETIME GB (min)	1628.
LIFETIME SC (min)	9328.
LIFETIME GBe (min)	0.1002E+05
LIFETIME SCE (min)	0.4089E+05

- 2 -

TOUSCHEK (min) 58.75  
 LIFETIME TOT.(min) 0.5232E-04

1

CHROMATICITIES (M.BASSETTI LEP NOTE 504)  
 BENDING 1.631 -15.52  
 EDGE 0.2474 -8.136  
 QUADRUPOLE -20.64 4.850  
 TOTAL CROM. -18.76 -11.48

TRANSFER MATRIX FOR ONE FULL PERIOD

0.245142845D+00	0.111574415D+02	-0.513171960D-04
-0.842401896D-01	0.245142845D+00	-0.572687202D-05
0.382198349D+00	0.147860870D+01	
-0.577518868D+00	0.382198349D+00	
COR.TOT.CROM. 2.400	4.000	
SEXTUPOLES INTEGRAL		
1 0.000000000D+00	0.657476481D-01	0.162476619D+00
2 0.000000000D+00	0.216359942D+00	0.162550988D+00
3 0.000000000D+00	0.216359942D+00	0.162550988D+00
4 0.000000000D+00	0.657476481D-01	0.162476619D+00
SEXT (T/M^2)==>(IF L=0 then LSEXT=1 meter)		
SD = -223.8		
SF = 123.4		

1

rosycfull.dat: version C of rosy 7 april 1993

	METERS	ETA	BETAX	BETAZ	PHX	PHZ
O	0.	-.6798E-04	11.51	1.600	0.	0.
O	1.030	-.6798E-04	11.60	2.263	5.114	32.77
O	2.060	-.6798E-04	11.88	4.252	10.15	52.16
QD	2.260	-.6952E-04	12.50	4.588	11.10	54.74
QD	2.460	-.7419E-04	14.32	4.537	11.96	57.23
O	2.610	-.7892E-04	16.27	4.358	12.52	59.16
O	2.760	-.8365E-04	18.35	4.192	13.02	61.18
QF	3.060	-.8649E-04	19.77	4.551	13.90	65.22
QF	3.360	-.7617E-04	15.46	6.562	14.86	68.45
O	3.570	-.6459E-04	11.22	8.962	15.77	70.01
O	3.780	-.5301E-04	7.657	11.75	17.07	71.19
QD	3.920	-.4600E-04	5.843	13.46	18.27	71.82
QD	4.060	-.4027E-04	4.564	14.49	19.83	72.39
O	4.160	-.3661E-04	3.839	14.97	21.20	72.78
O	4.260	-.3294E-04	3.181	15.45	22.84	73.16
A	4.260	-.3294E-04	3.181	15.45	22.84	73.16
B	5.196	0.6240E-01	0.3998	15.68	82.28	76.47
B	6.131	0.2640	2.614	9.360	154.1	80.72
A	6.131	0.2640	2.614	9.360	154.1	80.72
O	6.306	0.3179	3.664	7.873	157.4	81.89
O	6.481	0.3718	4.912	6.521	159.7	83.29
SD	6.481	0.3718	4.912	6.521	159.7	83.29
QF	6.621	0.4085	5.865	5.737	161.2	84.61
QF	6.761	0.4315	6.489	5.376	162.5	86.06
O	7.337	0.4967	8.422	4.762	167.0	92.59
O	7.913	0.5619	10.70	4.318	170.5	99.88
SF	7.913	0.5619	10.70	4.318	170.5	99.88
QF	8.113	0.5649	10.81	4.502	171.5	102.5
QF	8.313	0.5292	9.481	5.371	172.6	104.9
O	8.673	0.4310	6.306	7.932	175.3	108.0
O	9.033	0.3328	3.810	11.03	179.5	110.2

- 3 -

A	9.033	0.3328	3.810	11.03	179.5	110.2
B	9.656	0.2094	1.334	15.68	195.9	112.9
B	10.28	0.1621	0.6081	17.48	240.6	115.0
B	10.90	0.1860	1.332	15.68	285.4	117.2
B	11.53	0.2838	3.807	11.02	301.8	119.8
A	11.53	0.2838	3.807	11.02	301.8	119.8
O	11.94	0.3768	6.701	7.533	306.5	122.4
O	12.35	0.4699	10.48	4.744	309.3	126.3
QF	12.49	0.4936	11.58	4.096	310.0	128.2
QF	12.63	0.5006	11.94	3.766	310.7	130.2
O	13.51	0.4911	11.74	2.877	314.9	145.8
O	14.40	0.4817	11.67	2.592	319.3	164.7
O	15.28	0.4723	11.74	2.911	323.6	183.5
O	16.17	0.4629	11.94	3.834	327.9	198.9
QF	16.31	0.4536	11.58	4.171	328.6	200.9
QF	16.45	0.4289	10.48	4.833	329.3	202.7
O	16.86	0.3350	6.703	7.678	332.1	206.5
O	17.27	0.2411	3.808	11.23	336.8	209.1
A	17.27	0.2411	3.808	11.23	336.8	209.1
B	17.89	0.1392	1.333	15.98	353.1	211.7
B	18.51	0.1064	0.6082	17.81	397.9	213.8
B	19.14	0.1392	1.333	15.98	442.7	215.8
B	19.76	0.2411	3.808	11.23	459.0	218.5
A	19.76	0.2411	3.808	11.23	459.0	218.5
O	20.17	0.3350	6.703	7.678	463.7	221.0
O	20.58	0.4289	10.48	4.833	466.5	224.9
QF	20.72	0.4536	11.58	4.171	467.2	226.7
QF	20.86	0.4629	11.94	3.834	467.9	228.7
O	21.75	0.4723	11.74	2.911	472.2	244.0
O	22.63	0.4817	11.67	2.592	476.5	262.8
O	23.52	0.4911	11.74	2.877	480.9	281.7
O	24.40	0.5006	11.94	3.766	485.1	297.3
QF	24.54	0.4936	11.58	4.096	485.8	299.4
QF	24.68	0.4699	10.48	4.744	486.5	301.2
O	25.09	0.3768	6.701	7.533	489.3	305.1
O	25.50	0.2838	3.807	11.02	494.0	307.7
A	25.50	0.2838	3.807	11.02	494.0	307.7
B	26.12	0.1860	1.332	15.68	510.4	310.4
B	26.75	0.1621	0.6081	17.48	555.2	312.5
B	27.37	0.2094	1.334	15.68	599.9	314.6
B	28.00	0.3328	3.810	11.03	616.3	317.3
A	28.00	0.3328	3.810	11.03	616.3	317.3
O	28.36	0.4310	6.306	7.932	620.5	319.5
O	28.72	0.5292	9.481	5.371	623.2	322.7
QF	28.92	0.5649	10.81	4.502	624.3	325.0
QF	29.12	0.5619	10.70	4.318	625.3	327.6
SF	29.12	0.5619	10.70	4.318	625.3	327.6
O	29.69	0.4967	8.422	4.762	628.8	334.9
O	30.27	0.4315	6.489	5.376	633.3	341.5
QF	30.41	0.4085	5.865	5.737	634.6	342.9
QF	30.55	0.3718	4.912	6.521	636.1	344.2
SD	30.55	0.3718	4.912	6.521	636.1	344.2
O	30.72	0.3179	3.664	7.873	638.4	345.6
O	30.90	0.2640	2.614	9.360	641.7	346.8
A	30.90	0.2640	2.614	9.360	641.7	346.8
B	31.83	0.6240E-01	0.3998	15.68	713.5	351.1
B	32.77	-.3294E-04	3.181	15.45	773.0	354.4
A	32.77	-.3294E-04	3.181	15.45	773.0	354.4
O	32.87	-.3661E-04	3.839	14.97	774.6	354.9
O	32.97	-.4027E-04	4.564	14.49	776.0	355.1
QD	33.11	-.4600E-04	5.843	13.46	777.5	355.7
QD	33.25	-.5301E-04	7.657	11.75	778.7	356.3
O	33.46	-.6459E-04	11.22	8.962	780.0	357.5

O	33.67	-.7617E-04	15.46	6.562	780.9	359.1
QF	33.97	-.8649E-04	19.77	4.551	781.9	362.3
QF	34.27	-.8365E-04	18.35	4.192	782.8	366.4
O	34.42	-.7892E-04	16.27	4.358	783.3	368.4
O	34.57	-.7419E-04	14.32	4.537	783.8	370.3
QD	34.77	-.6952E-04	12.50	4.588	784.7	372.8
QD	34.97	-.6798E-04	11.88	4.252	785.7	375.4
O	36.00	-.6798E-04	11.60	2.263	790.7	394.8
O	37.03	-.6798E-04	11.51	1.600	795.8	427.5

**Anhang II.B: Eingabedaten für die Optiken ROSY A, ROSY B und ROSY C  
für das Programm RACETRACK**



alias anfang setenv RACE\_FILEROSEY - optimale Optik

SINGLE ELEMENTS-----

& drifts

O1	0	*	1.91
O3	0	*	0.3
O5	0	*	0.2
O51	0	*	0.22
O7	0	*	0.2
O10	0	*	0.15
O11	0	*	0.35
O13	0	*	1.00125
O14	0	*	0.42
O16	0	*	0.4
O18	0	*	1.61948
O24	0	*	0.67
O25	0	*	0.35
O26	0	*	0.31948

& quadrupoles

QD1	2	*	0.4	1.001064
QF2	2	*	0.6	-1.638911
QD3	2	*	0.28	1.300461
QD4	2	*	0.28	-1.639001
QF5	2	*	0.4	-1.753802
QE1	2	*	0.28	-1.734116

& dipoles

BEN1	6	*	1.8712633	15.0	14.44
BEN2	6	*	2.4950225	20.0	14.44
BENC	6	*	1.2475113	10.0	14.44

& edge focusing

O8	8	*	-0.13990495	7.5	0.282640
O19	8	*	-0.13990495	10.0	0.282640

& chromaticity compensation sextupoles

SV	103	*	0.9882101
SH	103	*	-0.9988508

& free dispersion region sextupoles

SV1	103	*	0.50
-----	-----	---	------

& printing element

GRAF 101

& wigglers and undulators

IDU	12	*	2.6
IDW1	12	*	1.56

NEXT

INSERTION DEVICE DATA-----

READ roa.iduw

NEXT

BLOCK DEFINITIONS-----

G1	O1
G11	O25
G2	O10 QD1 O3 QF2 O5 O51 QD3 O7
G2P	O8 BEN1 O8 O10
G3	O5 QD4 O13
G4	O10 QF5 O10 O14
G5	O10 O19 BENC BENC O19 O10
G6	O24 QE1 O10
G7	O18 O18
G8	O10 QE1 O24
G9	O10 O19 BENC
G91	BENC O19 O10
G81	O24 QE1 O10
G71	O26

```

G61 O10 QE1 O24
G51 O10 O19 BENC BENC O19 O10
G41 O14 O10 QF5 O10
G31 O13 QD4 O5
G2S O10 O8 BEN1 O8
G21 O7 QD3 O51 O5 QF2 O3 QD1 O10

```

NEXT

STRUCTURE INPUT-----

```

CEL1 = ( G1 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G7          SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

CEL2 = ( IDW1 G11 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G7          SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

CEL3 = ( IDW1 G11 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G71 IDU G71 SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

RING = ( GRAF CEL2 -CEL2 CEL3 -CEL3 CEL2 -CEL2
          CEL3 -CEL3 GRAF )

```

NEXT

OPTICS PRINTOUT-----

```
ELEM 0
```

NEXT

CHROMATICITY ADJUSTMENT-----

```
SH 0.0
SV 0.0
```

&NEXT

&TUNE ADJUSTMENT-----

```
& first quad : H , second quad : V
& Q2 0.30
& Q1 0.20
```

NEXT

INITIAL

```
RE 1 0.0 0.1 1.0
    0.0 2.0
```

NEXT

infeld, roa.iduw, Apr 21 1993 09:03:05

```

2 3.0 1
IDU 13 0.461 0.052 50 -10 0.0 0.0 0.0
IDW1 13 1.1 0.104 15 -5 0.0 0.0 0.0
&IDL 13 1.0 0.05 35 -7 0.0 0.0 0.0
&IDS 13 1.5 0.125 20 -10 0.0 0.0 0.0

```

alias anfang setenv RACE\_FILERSOY - optimale Optik

SINGLE ELEMENTS-----

& drifts

O1	0	*	1.91
O3	0	*	0.3
O5	0	*	0.2
O51	0	*	0.22
O7	0	*	0.2
O10	0	*	0.15
O11	0	*	0.35
O13	0	*	1.00125
O14	0	*	0.42
O16	0	*	0.4
O18	0	*	1.61948
O24	0	*	0.67
O25	0	*	0.35
O26	0	*	0.31948

& quadrupoles

QD1	2	*	0.4	1.049252
QF2	2	*	0.6	-1.669475
QD3	2	*	0.28	1.352735
QD4	2	*	0.28	-1.663144
QF5	2	*	0.4	-1.745563
QE1	2	*	0.28	-1.733556

& dipoles

BEN1	6	*	1.8712633	15.0	14.350
BEN2	6	*	2.4950225	20.0	14.350
BENC	6	*	1.2475113	10.0	14.350

& edge focusing

O8	8	*	-0.13990495	7.5	0.280879
O19	8	*	-0.13990495	10.0	0.280879

& chromaticity compensation sextupoles

SV	103	*	0.9882101
SH	103	*	-0.9988508

& free dispersion region sextupoles

SV1	103	*	0.50
-----	-----	---	------

& printing element

GRAF 101

& wigglers and undulators

IDU	12	*	2.6
IDW1	12	*	1.56

NEXT

INSERTION DEVICE DATA-----

READ roa.iduw

NEXT

BLOCK DEFINITIONS-----

G1	O1
G11	O25
G2	O10 QD1 O3 QF2 O5 O51 QD3 O7
G2P	O8 BEN1 O8 O10
G3	O5 QD4 O13
G4	O10 QF5 O10 O14
G5	O10 O19 BENC BENC O19 O10
G6	O24 QE1 O10
G7	O18 O18
G8	O10 QE1 O24
G9	O10 O19 BENC
G91	BENC O19 O10
G81	O24 QE1 O10
G71	O26

```

G61 O10 QEI O24
G51 O10 O19 BENC BENC O19 O10
G41 O14 O10 QF5 O10
G31 O13 QD4 O5
G2S O10 O8 BEN1 O8
G21 O7 QD3 O51 O5 QF2 O3 QD1 O10

```

NEXT

STRUCTURE INPUT-----

```

CEL1 = ( G1 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G7          SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

CEL2 = ( IDW1 G11 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G7          SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

CEL3 = ( IDW1 G11 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G71 IDU G71 SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

RING = ( GRAF CEL2 -CEL2 CEL3 -CEL3 CEL2 -CEL2
          CEL3 -CEL3 GRAF )

```

NEXT

OPTICS PRINTOUT-----

```
ELEM      0
```

NEXT

CHROMATICITY ADJUSTMENT-----

```
SH  0.0
SV  0.0
```

&NEXT

&TUNE ADJUSTMENT-----

& first quad : H , second quad : V

```
& Q2  0.30
```

```
& Q1  0.20
```

NEXT

INITIAL

```
RE 1 0.0 0.1 1.0
    0.0 2.0
```

NEXT

infeld, roa.iduw, Apr 21 1993 11:04:48

```

2 3.0 1
IDU 13 0.461 0.052 50 -10 0.0 0.0 0.0
IDW1 13 1.1 0.104 15 -5 0.0 0.0 0.0
&IDL 13 1.0 0.05 35 -7 0.0 0.0 0.0
&IDS 13 1.5 0.125 20 -10 0.0 0.0 0.0

```

alias anfang setenv RACE\_FILERO SY - optimale Optik

SINGLE ELEMENTS-----

& drifts

O1	0	*	1.91
O3	0	*	0.3
O5	0	*	0.2
O51	0	*	0.22
O7	0	*	0.2
O10	0	*	0.15
O11	0	*	0.35
O13	0	*	1.00125
O14	0	*	0.42
O16	0	*	0.4
O18	0	*	1.61948
O24	0	*	0.67
O25	0	*	0.35
O26	0	*	0.31948

& quadrupoles

QD1	2	*	0.4	1.124895
QF2	2	*	0.6	-1.713575
QD3	2	*	0.28	1.427155
QD4	2	*	0.28	-1.712216
QF5	2	*	0.4	-1.727930
QE1	2	*	0.28	-1.729539

& dipoles

BEN1	6	*	1.8712633	15.0	14.20
BEN2	6	*	2.4950225	20.0	14.20
BENC	6	*	1.2475113	10.0	14.20

& edge focusing

O8	8	*	-0.13990495	7.5	0.277941
O19	8	*	-0.13990495	10.0	0.277941

& chromaticity compensation sextupoles

SV	103	*	0.9882101
SH	103	*	-0.9988508

& free dispersion region sextupoles

SV1	103	*	0.50
-----	-----	---	------

& printing element

GRAF 101

& wigglers and undulators

IDU	12	*	2.6
IDW1	12	*	1.56

NEXT

INSERTION DEVICE DATA-----

READ roa.iduw

NEXT

BLOCK DEFINITIONS-----

G1	O1
G11	O25
G2	O10 QD1 O3 QF2 O5 O51 QD3 O7
G2P	O8 BEN1 O8 O10
G3	O5 QD4 O13
G4	O10 QF5 O10 O14
G5	O10 O19 BENC BENC O19 O10
G6	O24 QE1 O10
G7	O18 O18
G8	O10 QE1 O24
G9	O10 O19 BENC
G91	BENC O19 O10
G81	O24 QE1 O10
G71	O26

G61 O10 QEI O24  
 G51 O10 O19 BENC BENC O19 O10  
 G41 O14 O10 QF5 O10  
 G31 O13 QD4 O5  
 G2S O10 O8 BEN1 O8  
 G21 O7 QD3 O51 O5 QF2 O3 QD1 O10

NEXT

STRUCTURE INPUT-----

CEL1 = ( G1 G2 G2P  
           G3          SH SH  
           G4          SV SV  
           G5          SV SV  
           G6          SH  
           G7          SH  
           G8          SV  
           G9 )

CEL2 = ( IDW1 G11 G2 G2P  
           G3          SH SH  
           G4          SV SV  
           G5          SV SV  
           G6          SH  
           G7          SH  
           G8          SV  
           G9 )

CEL3 = ( IDW1 G11 G2 G2P  
           G3          SH SH  
           G4          SV SV  
           G5          SV SV  
           G6          SH  
           G71 IDU G71 SH  
           G8          SV  
           G9 )

RING = ( GRAF CEL2 -CEL2 CEL3 -CEL3 CEL2 -CEL2  
           CEL3 -CEL3 GRAF )

NEXT

OPTICS PRINTOUT-----

ELEM 0

NEXT

CHROMATICITY ADJUSTMENT-----

SH 0.0

SV 0.0

&NEXT

&TUNE ADJUSTMENT-----

& first quad : H , second quad : V

& Q2 0.30

& Q1 0.20

NEXT

INITIAL

RE 1 0.0 0.1 1.0

0.0 2.0

NEXT

einfeld, roa.iduw, Apr 21 1993 17:06:20

2 3.0 1

IDU 13 0.461 0.052 50 -10 0.0 0.0 0.0

IDW1 13 1.1 0.104 15 -5 0.0 0.0 0.0

&IDL 13 1.0 0.05 35 -7 0.0 0.0 0.0

&IDS 13 1.5 0.125 20 -10 0.0 0.0 0.0

Anhang II.C: Eingabedaten der Optik ROSY A, inklusive der Multipolfehler bis  $n=10$ , für das Programm BETA und Ergebnis der dynamischen Apertur

\*\*\* LIST OF ELEMENTS \*\*\*

93					
1	SD	0.500000E+00			
QD1	QP	0.200000E+00	-.100106E+01		
3	SD	0.300000E+00			
QF2	QP	0.300000E+00	0.163891E+01		
5	SD	0.200000E+00			
QD3	QP	0.140000E+00	-.130046E+01		
7	SD	0.300000E+00			
8	CO	0.130900E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
BEN1	DI	0.130900E+00	0.714771E+01	0.144399E+02	0.000000E+00
10	SD	0.150000E+00			
11	SD	0.350000E+00			
QD4	QP	0.140000E+00	0.163900E+01		
13	SD	0.100125E+01			
14	SD	0.420000E+00			
QF5	QP	0.200000E+00	0.175380E+01		
16	SD	0.400000E+00			
QE1	QP	0.140000E+00	0.173412E+01		
18	SD	0.161948E+01			
19	CO	0.174533E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
BEN2	DI	0.174533E+00	0.714771E+01	0.144399E+02	0.000000E+00
SV	SX	0.100000E-04	-.992864E+05		
SH	SX	0.100000E-04	0.987993E+05		
23	SD	0.620000E+00			
24	SD	0.620000E+00			
25	SD	0.530000E+00			
SQ1	SX	0.100000E-04	-.484000E+03		
SQ2	SX	0.100000E-04	0.726000E+03		
SQ3	SX	0.100000E-04	0.340000E+03		
SQ4	SX	0.100000E-04	0.340000E+03		
SQ5	SX	0.100000E-04	0.484000E+03		
SQ6	SX	0.100000E-04	0.340000E+03		
32	SD	0.319480E+00			
SB1	SX	0.100000E-04	-.650000E+04		
SB2	SX	0.100000E-04	-.861000E+04		
CAV	CA	0.100000E+05	0.218000E+00	0.250000E+10	
WIG	ID	0.156000E+01	0.909710E+01	0.300000E-10	0.104000E+00
UND	ID	0.260000E+01	0.217067E+02	0.300000E-01	0.520000E-01
MQ14	LD	-.812000E-01	0.800000E+01	0.000000E+00	
MQ15	LD	0.615000E+01	0.100000E+02	0.000000E+00	
MQ16	LD	-.444000E+03	0.120000E+02	0.000000E+00	
MQ17	LD	-.181000E+04	0.140000E+02	0.000000E+00	
MQ18	LD	0.268000E+06	0.160000E+02	0.000000E+00	
MQ19	LD	-.744000E+06	0.280000E+02	0.000000E+00	
MQ10	LD	-.284000E+08	0.200000E+02	0.000000E+00	
MQ24	LD	0.122000E+00	0.800000E+01	0.000000E+00	
MQ25	LD	-.923000E+01	0.100000E+02	0.000000E+00	
MQ26	LD	0.666000E+03	0.120000E+02	0.000000E+00	
MQ27	LD	0.272000E+04	0.140000E+02	0.000000E+00	
MQ28	LD	-.402000E+06	0.160000E+02	0.000000E+00	
MQ29	LD	0.112000E+07	0.180000E+02	0.000000E+00	
MQ20	LD	0.426000E+08	0.200000E+02	0.000000E+00	
MQ34	LD	0.568000E-01	0.800000E+01	0.000000E+00	
MQ35	LD	0.431000E+01	0.100000E+02	0.000000E+00	
MQ36	LD	-.318000E+03	0.120000E+02	0.000000E+00	
MQ37	LD	-.127000E+04	0.140000E+02	0.000000E+00	
MQ38	LD	0.188000E+06	0.160000E+02	0.000000E+00	
MQ39	LD	-.521000E+06	0.180000E+02	0.000000E+00	
MQ30	LD	-.199000E+08	0.200000E+02	0.000000E+00	
MQ44	LD	0.568000E-01	0.800000E+01	0.000000E+00	
MQ45	LD	-.431000E+01	0.100000E+02	0.000000E+00	
MQ46	LD	0.318000E+03	0.120000E+02	0.000000E+00	
MQ47	LD	0.127000E+04	0.140000E+02	0.000000E+00	



MQ48	LD	- .188000E+06	0.160000E+02	0.000000E+00
MQ49	LD	0.521000E+06	0.180000E+02	0.000000E+00
MQ40	LD	0.199000E+08	0.200000E+02	0.000000E+00
MQ54	LD	0.812000E-01	0.800000E+01	0.000000E+00
MQ55	LD	- .615000E+01	0.100000E+02	0.000000E+00
MQ56	LD	0.444000E+03	0.120000E+02	0.000000E+00
MQ57	LD	0.181000E+04	0.140000E+02	0.000000E+00
MQ58	LD	- .268000E+06	0.160000E+02	0.000000E+00
MQ59	LD	0.744000E+06	0.180000E+02	0.000000E+00
MQ50	LD	0.284000E+08	0.200000E+02	0.000000E+00
MQE4	LD	0.568000E-01	0.800000E+01	0.000000E+00
MQE5	LD	- .431000E+01	0.100000E+02	0.000000E+00
MQE6	LD	0.318000E+03	0.120000E+02	0.000000E+00
MQE7	LD	0.127000E+04	0.140000E+02	0.000000E+00
MQE8	LD	- .188000E+06	0.000000E+00	0.160000E+02
MQE9	LD	0.521000E+06	0.180000E+02	0.000000E+00
MQE0	LD	0.199000E+08	0.200000E+02	0.000000E+00
BE14	LD	- .130000E+00	0.800000E+01	0.000000E+00
BE15	LD	0.686400E+02	0.100000E+02	0.000000E+00
BE16	LD	0.363260E+03	0.120000E+02	0.000000E+00
BE17	LD	- .912300E+05	0.140000E+02	0.000000E+00
BE18	LD	- .327400E+06	0.160000E+02	0.000000E+00
BE19	LD	- .697700E+05	0.180000E+02	0.000000E+00
BE10	LD	- .926200E+08	0.200000E+02	0.000000E+00
BE24	LD	- .173000E+00	0.800000E+01	0.000000E+00
BE25	LD	0.915000E+02	0.100000E+02	0.000000E+00
BE26	LD	0.599600E+03	0.120000E+02	0.000000E+00
BE27	LD	- .121600E+06	0.140000E+02	0.000000E+00
BE28	LD	- .436400E+06	0.160000E+02	0.000000E+00
BE29	LD	- .107400E+06	0.180000E+02	0.000000E+00
BE20	LD	- .123500E+09	0.200000E+02	0.000000E+00

\*\*\* STRUCTURE \*\*\*

1036

WIG	1	QD1	SQ1	MQ14	MQ15	MQ16	MQ17	MQ18	MQ19
MQ10	QD1	3	QF2	SQ2	MQ24	MQ25	MQ26	MQ27	MQ28
MQ29	MQ20	QF2	14	QD3	SQ3	MQ34	MQ35	MQ36	MQ37
MQ38	MQ39	MQ30	QD3	5	8	BEN1	SB1	BE14	BE15
BE16	BE17	BE18	BE19	BE10	BEN1	8	5	10	QD4
SQ4	MQ44	MQ45	MQ46	MQ47	MQ48	MQ49	MQ40	QD4	13
SH	SH	10	QF5	SQ5	MQ54	MQ55	MQ56	MQ57	MQ58
MQ59	MQ50	QF5	10	14	SV	SV	10	19	BEN2
SB2	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE20	BEN2	19
5	SV	SV	24	QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7
MQE8	MQE9	MQE0	QEI	10	SH	18	18	SH	10
QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI
24	SV	5	19	BEN2	SB2	BE24	BE25	BE26	BE27
BE28	BE29	BE20	BEN2	19	5	SV	24	QEI	SQE
MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI	10	SH
18	18	SH	10	QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7
MQE8	MQE9	MQE0	QEI	24	SV	SV	5	19	BEN2
SB2	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE20	BEN2	19
10	SV	SV	14	10	QF5	SQ5	MQ54	MQ55	MQ56
MQ57	MQ58	MQ59	MQ50	QF5	10	SH	SH	13	QD4
SQ4	MQ44	MQ45	MQ46	MQ47	MQ48	MQ49	MQ40	QD4	10
5	8	BEN1	SB1	BE14	BE15	BE16	BE17	BE18	BE19
BE10	BEN1	8	5	QD3	SQ3	MQ34	MQ35	MQ36	MQ37
MQ38	MQ39	MQ30	QD3	14	QF2	SQ2	MQ24	MQ25	MQ26
MQ27	MQ28	MQ29	MQ20	QF2	3	QD1	SQ1	MQ14	MQ15
MQ16	MQ17	MQ18	MQ19	MQ10	QD1	1	WIG	WIG	1
QD1	SQ1	MQ14	MQ15	MQ16	MQ17	MQ18	MQ19	MQ10	QD1
3	QF2	SQ2	MQ24	MQ25	MQ26	MQ27	MQ28	MQ29	MQ20
QF2	14	QD3	SQ3	MQ34	MQ35	MQ36	MQ37	MQ38	MQ39
MQ30	QD3	5	8	BEN1	SB1	BE14	BE15	BE16	BE17
BE18	BE19	BE10	BEN1	8	5	10	QD4	SQ4	MQ44

MQ45	MQ46	MQ47	MQ48	MQ49	MQ40	QD4	13	SH	SH
10	QF5	SQ5	MQ54	MQ55	MQ56	MQ57	MQ58	MQ59	MQ50
QF5	10	14	SV	SV	10	19	BEN2	SB2	BE24
BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE20	BEN2	19	5	SV
SV	24	QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9
MQE0	QEI	10	SH	32	UND	32	SH	10	QEI
SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI	24
SV	5	19	BEN2	SB2	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28
BE29	BE20	BEN2	19	5	SV	24	QEI	SQE	MQE4
MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI	10	SH	32
UND	32	SH	10	QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7
MQE8	MQE9	MQE0	QEI	24	SV	SV	5	19	BEN2
SB2	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE20	BEN2	19
10	SV	SV	14	10	QF5	SQ5	MQ54	MQ55	MQ56
MQ57	MQ58	MQ59	MQ50	QF5	10	SH	SH	13	QD4
SQ4	MQ44	MQ45	MQ46	MQ47	MQ48	MQ49	MQ40	QD4	10
5	8	BEN1	SB1	BE14	BE15	BE16	BE17	BE18	BE19
BE10	BEN1	8	5	QD3	SQ3	MQ34	MQ35	MQ36	MQ37
MQ38	MQ39	MQ30	QD3	14	QF2	SQ2	MQ24	MQ25	MQ26
MQ27	MQ28	MQ29	MQ20	QF2	3	QD1	SQ1	MQ14	MQ15
MQ16	MQ17	MQ18	MQ19	MQ10	QD1	1	WIG	WIG	1
QD1	SQ1	MQ14	MQ15	MQ16	MQ17	MQ18	MQ19	MQ10	QD1
3	QF2	SQ2	MQ24	MQ25	MQ26	MQ27	MQ28	MQ29	MQ20
QF2	14	QD3	SQ3	MQ34	MQ35	MQ36	MQ37	MQ38	MQ39
MQ30	QD3	5	8	BEN1	SB1	BE14	BE15	BE16	BE17
BE18	BE19	BE10	BEN1	8	5	10	QD4	SQ4	MQ44
MQ45	MQ46	MQ47	MQ48	MQ49	MQ40	QD4	13	SH	SH
10	QF5	SQ5	MQ54	MQ55	MQ56	MQ57	MQ58	MQ59	MQ50
QF5	10	14	SV	SV	10	19	BEN2	SB2	BE24
BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE20	BEN2	19	5	SV
SV	24	QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9
MQE0	QEI	10	SH	18	18	SH	10	QEI	SQE
MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI	24	SV
5	19	BEN2	SB2	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29
BE20	BEN2	19	5	SV	24	QEI	SQE	MQE4	MQE5
MQE6	MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI	10	SH	18	18
SH	10	QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9
MQE0	QEI	24	SV	SV	5	19	BEN2	SB2	BE24
BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE20	BEN2	19	10	SV
SV	14	10	QF5	SQ5	MQ54	MQ55	MQ56	MQ57	MQ58
MQ59	MQ50	QF5	10	SH	SH	13	QD4	SQ4	MQ44
MQ45	MQ46	MQ47	MQ48	MQ49	MQ40	QD4	10	5	8
BEN1	SB1	BE14	BE15	BE16	BE17	BE18	BE19	BE10	BEN1
8	5	QD3	SQ3	MQ34	MQ35	MQ36	MQ37	MQ38	MQ39
MQ30	QD3	14	QF2	3	QD1	SQ1	MQ14	MQ15	MQ16
MQ29	MQ20	QF2	3	QD1	SQ1	MQ14	MQ15	MQ16	MQ17
MQ18	MQ19	MQ10	QD1	1	WIG	WIG	1	QD1	SQ1
MQ14	MQ15	MQ16	MQ17	MQ18	MQ19	MQ10	QD1	3	QF2
SQ2	MQ24	MQ25	MQ26	MQ27	MQ28	MQ29	MQ20	QF2	14
QD3	SQ3	MQ34	MQ35	MQ36	MQ37	MQ38	MQ39	MQ30	QD3
5	8	BEN1	SB1	BE14	BE15	BE16	BE17	BE18	BE19
BE10	BEN1	8	5	10	QD4	SQ4	MQ44	MQ45	MQ46
MQ47	MQ48	MQ49	MQ40	QD4	13	SH	SH	10	QF5
SQ5	MQ54	MQ55	MQ56	MQ57	MQ58	MQ59	MQ50	QF5	10
14	SV	SV	10	19	BEN2	SB2	BE24	BE25	BE26
BE27	BE28	BE29	BE20	BEN2	19	5	SV	SV	24
QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI
10	SH	32	UND	32	SH	10	QEI	SQE	MQE4
MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI	24	SV	5
19	BEN2	SB2	BE24	BE25	BE26	BE27	BE28	BE29	BE20
BEN2	19	5	SV	24	QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6
MQE7	MQE8	MQE9	MQE0	QEI	10	SH	32	UND	32
SH	10	QEI	SQE	MQE4	MQE5	MQE6	MQE7	MQE8	MQE9
MQE0	QEI	24	SV	SV	5	19	BEN2	SB2	BE24

```

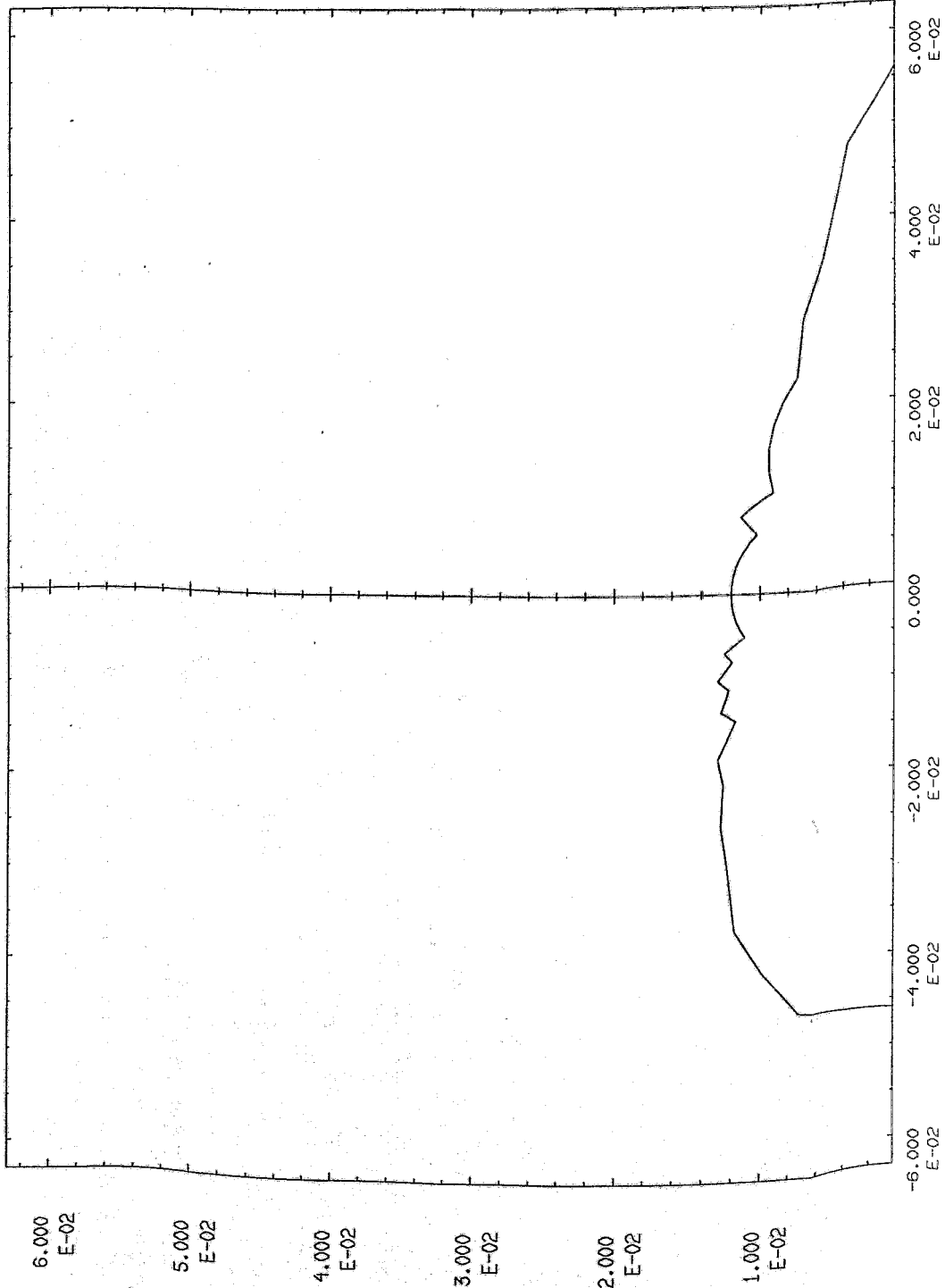
BE25 BE26 BE27 BE28 BE29 BE20 BEN2 19 10 SV
SV 14 10 QF5 SQ5 MQ54 MQ55 MQ56 MQ57 MQ58
MQ59 MQ50 QF5 10 SH SH 13 QD4 SQ4 MQ44
MQ45 MQ46 MQ47 MQ48 MQ49 MQ40 QD4 10 5 8
BEN1 SB1 BE14 BE15 BE16 BE17 BE18 BE19 BE10 BEN1
8 5 QD3 SQ3 MQ34 MQ35 MQ36 MQ37 MQ38 MQ39
MQ30 QD3 14 QF2 SQ2 MQ24 MQ25 MQ26 MQ27 MQ28
MQ29 MQ20 QF2 3 QD1 SQ1 MQ14 MQ15 MQ16 MQ17
MQ18 MQ19 MQ10 QD1 1 WIG

```

1  
\*\*\* PARTICLE TYPE \*\*\*

E  
\*\*\* PARAMETERS OF FIT \*\*\*

2					
21	2	0			
22	2	0			
2					
3	1	0	0	0.00000E+00	0.10000E+01
3	2	0	0	0.00000E+00	0.10000E+01



**Anhang II.D: Eingabedaten der Optik mit supraleitenden Magneten für das Programm RACETRACK**

alias anfang setenv RACE\_FILERO5Y - optimale Optik

SINGLE ELEMENTS-----

& drifts

O1	0	*	1.91
O3	0	*	0.3
O5	0	*	0.2
O51	0	*	0.22
O7	0	*	0.2
O10	0	*	0.15
O11	0	*	0.35
O13	0	*	1.00125
O14	0	*	0.42
O16	0	*	0.4
O18	0	*	1.61948
O24	0	*	0.67
O25	0	*	0.35
O26	0	*	0.31948
DS1	0	*	0.72
DS2	0	*	0.56842

& quadrupoles

QD1	2	*	0.4	1.001000
QF2	2	*	0.6	-1.638900
QD3	2	*	0.28	1.300400
QD4	2	*	0.28	-1.552000
QF5	2	*	0.4	-1.755000
QE1	2	*	0.28	-1.829600
QEJ	2	*	0.28	-1.920500
QS	2	*	0.28	1.618200

& dipoles

BEN1	6	*	1.8712500	15.0	14.4594
BEN2	6	*	2.4950000	20.0	14.4594
BENC	6	*	1.2475000	10.0	14.4594
BENS	6	*	0.3490700	10.0	0.00

& edge focusing

O8	8	*	-0.1399	7.5	0.283
O19	8	*	-0.1399	10.0	0.283

& chromaticity compensation sextupoles

SV	103	*	0.9882101
SH	103	*	-0.9988508

& free dispersion region sextupoles

SV1	103	*	0.50
-----	-----	---	------

& printing element

GRAF 101

& wigglers and undulators

IDU	12	*	2.6
IDW1	12	*	1.56

NEXT

INSERTION DEVICE DATA-----

READ roa.iduw

NEXT

BLOCK DEFINITIONS-----

G1	O1
G11	O25
G2	O10 QD1 O3 QF2 O5 O51 QD3 O7
G2P	O8 BEN1 O8 O10
G3	O5 QD4 O13
G4	O10 QF5 O10 O14
G5	O10 O19 BENC BENC O19 O10
G6	O24 QE1 O10
G7	O18 O18

```

G8 O10 QEJ DS1 QS DS2
G9 O10 BENS
G91 BENC O19 O10
G81 O24 QEI O10
G71 O26
G61 O10 QEI O24
G51 O10 O19 BENC BENC O19 O10
G41 O14 O10 QF5 O10
G31 O13 QD4 O5
G2S O10 O8 BEN1 O8
G21 O7 QD3 O51 O5 QF2 O3 QD1 O10

```

NEXT

STRUCTURE INPUT-----

```

CEL1 = ( G1 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G7          SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

CEL2 = ( IDW1 G11 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G7          SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

CEL3 = ( IDW1 G11 G2 G2P
          G3          SH SH
          G4          SV SV
          G5          SV SV
          G6          SH
          G71 IDU G71 SH
          G8          SV
          G9 )

```

```

RING = ( GRAF CEL2 -CEL2 CEL3 -CEL3 CEL2 -CEL2
          CEL3 -CEL3 GRAF )

```

NEXT

OPTICS PRINTOUT-----

```
ELEM 0
```

NEXT

CHROMATICITY ADJUSTMENT-----

```

SH 0.0
SV 0.0

```

&NEXT

&TUNE ADJUSTMENT-----

```

& first quad : H , second quad : V
& Q2 0.30
& Q1 0.20

```

NEXT

```

INITIAL
RE 1 0.0 0.1 1.0
    0.0 2.0

```

NEXT

## Mitarbeiter

aus dem FZR

M. Betzl, R. Bergmann, H. Büttig, S. Dienel, F. Eichhorn, D. Einfeld, W. Gläser, H. Guratzsch, G. Höhnel, D. Janssen, B. Johannsen, H. Krug, W. Matz, W. Möller, W. Neumann, H. Nitsche, W. Oehme, D. Pröhl, F. Prokert, R. Schlenk, H. Tyrroff, K. Walther und E. Wieser.

aus anderen Einrichtungen

H. Kirk (BNL, Brookhaven), A. Krüssel und G. Müller (Fachhochschule Ostfriesland), J. Murphy (NSLS, Brookhaven), M. Plesko und D. Tommasini (Sincrotrone Trieste), M. Picard und Th. Götz (Universität Bonn), R. Rossmanith (CEBAF, Newport News)

## Danksagungen

Für die Beiträge des Anhanges I.C sind wir den Herren F. Bigl (Leipzig), T. Butz (Leipzig), W. Hermel (Dresden), W. Hoyer (Chemnitz), D. Hötzsch (Dresden), J. Hrdy (Prag), D. Jehnichen (Dresden), A. Kisiel (Krakow), P. Klimanek (Freiberg), H. Langbein (Dresden), N. Mattern (Dresden), H. Oettel (Freiberg), P. Paufler (Dresden), A. Pohlers (Dresden), W. Schmitz (Leipzig), R. Szargan (Leipzig), B. Wehner (Dresden), H. Worch (Dresden) der genannten Institute und Arbeitsgruppen zu Dank verpflichtet.

Für viele nützliche Diskussionen bedanken wir uns bei den Kollegen H. Frischholz (CERN), G. Geschonke (CERN), P. Gürtler (HASYLAB/DESY), J. Jakob (ESRF), J. Koupsidis (DESY), J. Schaper (Fachhochschule Ostfriesland), R. Walker (Sincrotrone Trieste), H. Wiedemann (SSRL), G. Wüstefeld (BESSY) sowie weiteren Mitarbeitern von CERN, DESY, ESRF, Sincrotrone Trieste und der Universität Bonn.

Ein besonderer Dank gilt den Mitgliedern der Beratungskomitees "Synchrotronstrahlung" : R. Haensel (ESRF/Kiel), R. Frahm (Hamburg), J. Hrdy (Prag), A. Kisiel (Krakow), P. Paufler (Dresden), W. Schülke (Dortmund) und "Maschine": G. Mülhaupt (ESRF), K. Hübner (CERN), D. Husmann (Bonn), E. Jaeschke (Berlin), R. Maier (Jülich), H. Neseemann, D. Roßbach (Hamburg), A. Wrulich (Trieste), die durch ihre Tätigkeit wesentlichen Einfluß auf den vorliegenden Bericht nahmen.

Die Projektstudie wurde freundlicherweise vom Sächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert.