

# UNIVERSITÄT BONN

## Physikalisches Institut

### Der Closed-Orbit der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA: Simulation, Messung und Korrektur

von  
Michael Gentner

For the planned acceleration of polarized electrons the closed orbit correction system of the Electron Stretcher Accelerator ELSA has been improved. Simulations have been done to get a deeper understanding how the ELSA closed orbit behaves, and how to improve the correction facilities. Work has been done on the ELSA beam position monitors, and the development of a new narrow band signal processing electronics has been started. Software for controlling the beam position monitors and corrector magnets, as well as for calculating the corrector magnet strengths for the desired closed orbit correction, has been developed to work under the new ELSA control system. Closed orbit measurements and corrections have been performed to test the software, the hardware and the simulation results. A beam position measurement method using the variation of the focusing strength of a quadrupol has been tested.

Post address:  
Nussallee 12  
53115 Bonn  
Germany



BONN-IB-95-37  
Bonn University  
December 1995

UNIVERSITÄT BONN  
Physikalisches Institut

**Der Closed-Orbit der  
Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA:  
Simulation, Messung und Korrektur**

von  
Michael Gentner

Dieser Forschungsbericht wurde als Diplomarbeit von der Mathematisch - Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn angenommen.

Angenommen am: 23.11.1995  
Referent: Prof. Dr. D. Husmann  
Korreferent: Prof. Dr. W. Schulle

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die Beschleunigeranlage des Physikalischen Instituts Bonn . . . . .	1
1.2	Closed-Orbit-Korrektur . . . . .	2
1.3	Inhalt dieser Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Theorie und Algorithmen zur Closed-Orbit-Korrektur</b>	<b>5</b>
2.1	Kurze Einführung in die transversale Strahloptik . . . . .	5
2.2	Korrektur des Closed-Orbits . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Simulationen zum Closed-Orbit und dessen Korrektur</b>	<b>12</b>
3.1	Einfluß von statistischen Stell- und Feldfehlern auf den Closed-Orbit . . . . .	12
3.2	Closed-Orbit-Korrektur an ELSA . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Closed-Orbit-Messung</b>	<b>19</b>
4.1	Strahllagemonitore . . . . .	19
4.2	Pickup-Methode . . . . .	21
4.3	Die Elektronik der ELSA-Strahllagemonitore . . . . .	22
4.4	Nachteile des ELSA-Monitorsystems . . . . .	22
4.5	Eine neue Elektronik für die ELSA-Monitore . . . . .	24
4.6	Nullpunktseichung von Strahllagemonitoren . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Software zur Orbit-Korrektur</b>	<b>29</b>
5.1	Das neue ELSA-Kontrollsystem . . . . .	29
5.2	Software für die Strahllagemonitore . . . . .	30
5.3	Software für die Korrektoren-Kontrolle . . . . .	30
5.4	Software zur Berechnung von Orbit-Korrekturen . . . . .	31
5.5	Meßprogramme . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Closed-Orbit-Messungen</b>	<b>35</b>
6.1	Dispersionsbahnen, horizontale Monitor-Linearität . . . . .	35
6.2	Linearität der Korrektoren . . . . .	36
6.3	Kickbahnen, vertikale Monitor-Linearität . . . . .	37
6.4	Orbit-Response-Matrix und Winkel-Strom-Eichung der Korrektoren . . . . .	39
6.5	Test-Messungen zur Quadrupol-Methode . . . . .	39
6.6	Einflüsse von Arbeitspunkt, Strahlstrom und Strahlenergie auf den Closed-Orbit . . . . .	40
6.7	Tests der Software zur Orbit-Korrektur . . . . .	42
6.8	Iterierte Orbit-Korrektur, bei verschiedenen Energien . . . . .	46
6.9	Der $z$ -Orbit . . . . .	49
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>53</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	53
7.2	Schnelles Feedback-System . . . . .	53
7.3	Orbitkorrektur für Polarisationserhaltung . . . . .	54

<b>A Tabellen mit detaillierten Meßergebnissen</b>	<b>55</b>
A.1 Pickup-Messungen (zu Kapitel 4.2) . . . . .	56
A.2 Dispersions-Messungen (zu Kapitel 6.1) . . . . .	57
A.3 Kickbahn-Messungen (zu Kapitel 6.3) . . . . .	58
A.4 Shunt-Messungen (zu Kapitel 6.5) . . . . .	59
A.5 Orbitspektren bei Korrektur ausgewählter Harmonischer (zu Abschnitt 6.7.3) . . . . .	60

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Die Beschleunigeranlage des Physikalischen Instituts Bonn

Das Physikalische Institut der Universität Bonn widmet sich traditionsgemäß der Beschleunigerphysik und Experimenten an Beschleunigern. So besitzt es eine eigene Beschleunigeranlage (Bild 1.1), deren Hauptbestandteil die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA ist [Husmann88]. In ihr können Elektronen einer Energie von bis zu 3.5 GeV beschleunigt, gespeichert und langsam extrahiert werden. Als Injektor dient ein Boostersynchrotron in Combined-Function-Bauweise [Althoff68], das wiederum einen 20 MeV-LINAC als Vorbeschleuniger besitzt. Die Injektionsenergie für ELSA kann von 0.5 bis 1.8 GeV frei gewählt werden; dieser Bereich ist begrenzt durch die Eigenschaften des Boostersynchrotrons bzw. dessen Extraktionselemente.

Motiviert wurde der Bau von ELSA durch den Wunsch, am (externen) Experiment ein möglichst hohes Tastverhältnis<sup>1</sup> zur Verfügung zu haben. Dies wird möglich durch das Prinzip der langsamen Extraktion. Dabei wird der Elektronenstrahl nahezu gleichmäßig aus ELSA extrahiert, so daß am Experiment ein konstanter Teilchenstrom bei Endenergie zur Verfügung steht, der lediglich durch die Injektions- und Beschleunigungsphasen unterbrochen wird.

Die Experimente, die Gebrauch vom extrahierten Elektronenstrahl machen, sind zur Zeit das Elektronen-Streuxperiment ELAN („Elektronen an Nukleonen“) und die Photonen-Experimente SAPHIR („Spektrometer-Anordnung für photonen-induzierte Reaktionen“) und PHOENICS („Photonen-induzierte Experimente an Nukleonen im Counter-Setup“). Letztere verwenden energiemarkierte (getaggte) Photonen, die in einem Primärtarget erzeugt werden, für Reaktionen am eigentlichen Sekundärtarget. In den Experimenten werden zum Teil polarisierte Targets verwendet.

Den Experimenten angepaßt sind die Betriebsmodi von ELSA. Bei niedrigen Energien bis 1.6 GeV wird der vom Booster injizierte Strahl innerhalb der Zeit, die bis zur nächsten Injektion vergeht, extrahiert (Stretchermodus). Da das Booster-Synchrotron in einem festen 50 Hz-Zyklus arbeitet, ist diese Zeit ein Vielfaches von 20 ms.

Bei höheren Energien werden zuerst für kurze Zeit die vom Booster ankommenden Elektronen gesammelt (akkumuliert), dann beschleunigt, und anschließend über einen Zeitraum von bis zu einer Minute extrahiert (Nachbeschleunigungsmodus).

Für die einzelnen Experimente werden verschiedene Extraktionsmechanismen verwendet. Beim Experiment PHOENICS wird ein dünner Beryllium-Faden an den Strahl gefahren. Durch Vielfach-Streuung an diesem Faden wird ein Teil der Strahlteilchen so stark abgelenkt, daß er über einen Septummagneten an das Experiment geführt werden kann.

Bei den anderen beiden Experimenten verwendet man das Prinzip der Resonanz-Extraktion. Dabei wird der horizontale Arbeitspunkt mit speziellen Quadrupolen an einen drittelzahligen Wert gefahren. Bei diesem führen die Teilchen Schwingungen aus, die in drei Umläufen eine geschlossene Bahn besitzen. Diese Schwingungen können an einem solchen Arbeitspunkt mit Sextupolen resonanzartig angeregt werden. Bei entsprechender Einstellung kann so über den Extraktionszeitraum eine möglichst konstante Rate an Elektronen über einen Septummagneten abgeführt werden.

---

<sup>1</sup>Verhältnis von der Zeit mit Strahl zur Gesamtzeit

Eine andere Gruppe von Experimenten an ELSA verwendet nicht einen extrahierten Elektronenstrahl, sondern die bei der Beschleunigung von Elektronen entstehende sogenannte Synchrotronstrahlung. Mit den allgemeinen Gesetzen der Elektrodynamik kann man zeigen, daß beschleunigte Ladung elektromagnetische Strahlung abgibt. Da das Halten der Elektronen auf einer Kreisbahn eine Beschleunigung ist, entsteht schon beim reinen Speichern eines Elektronenstrahls in den ablenkenden Dipolmagneten eines Kreisbeschleunigers diese Strahlung.

So entsteht in den Dipolen von ELSA bei den Strahlenergien im GeV-Bereich intensives, scharf gebündeltes Licht im sichtbaren, UV- und Röntgenbereich, das für Experimente in den Bereichen Spektroskopie und Lithographie verwendet wird. Daher wird für diese Experimente der Elektronenstrahl möglichst lange gespeichert (Speichermodus).

In Zukunft sollen auch Experimente mit polarisierten Elektronen durchgeführt werden. So ist das GDH-Experiment im Aufbau, das die sogenannte Gerasimov-Drell-Hearn-Summenregel überprüfen soll. Die dafür nötigen Quellen für polarisierte Elektronen sind ebenfalls im Aufbau.

## 1.2 Closed-Orbit-Korrektur

Beim Entwurf und Aufbau eines Beschleunigers wird eine bestimmte Sollbahn für die Strahlteilchen festgelegt. Immer vorhandene Stell- und Feldfehler der Magnete stören allerdings diese Teilchenbahn; die sich einstellende Gleichgewichtsbahn wird im allgemeinen mit Closed-Orbit bezeichnet.

Da die Apertur den Spielraum für Abweichungen von der Sollbahn begrenzt, ist man daran interessiert, den gestörten Closed-Orbit durch Korrekturen möglichst wieder auf die Sollbahn zu schieben. Dies verbessert die Lebensdauer des Strahls.

Neben dieser offensichtlichen Motivation gibt es aber noch weitere Gründe, weshalb man den Closed-Orbit korrigieren möchte.

Beispielsweise bedeutet in der Anwendung von Beschleunigern als Synchrotronlicht-Maschinen eine Verschiebung des Closed-Orbits eine Verschiebung der Lichtquelle. Da die in solchen Beschleunigern entstehenden Lichtkegel einen sehr kleinen Öffnungswinkel haben, ist man an einer präzisen Positionierung des Strahls interessiert. Die Einrichtungen zur Closed-Orbit-Korrektur müssen den Strahl sowohl im Kurzzeit-, als auch im Langzeitbereich stabilisieren.

Eine zukünftige Aufgabe für ELSA ist die Beschleunigung polarisierter Elektronen für die Mittelenergiephysik-Experimente. Beim Beschleunigungsprozeß werden dabei Strahlenergien gekreuzt, bei denen es aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Teilchenspin und horizontalen Magnetfeldern einen depolarisierenden Effekt gibt. Eine Gruppe dieser depolarisierenden Effekte sind die sogenannten Imperfektion-Resonanzen, deren Stärke mit dem RMS-Wert<sup>2</sup> der vertikalen Orbitauslenkungen skalieren. Also ist auch hier eine gute Orbitkorrektur notwendig.

## 1.3 Inhalt dieser Arbeit

Die Orbitkorrektur an ELSA war schon das Thema einer früheren Diplomarbeit [Wenzel90]. In der Zwischenzeit aber wurde das aufgebaute System mangels akuter Notwendigkeit kaum verwendet, und wenn, dann auch nur für die Messung und Korrektur der horizontalen Strahllage. Spätestens mit der Inbetriebnahme eines neuen Kontrollsystems zur Steuerung des Beschleunigers ([Goetz95] und [Picard95]) war es nicht mehr einsatzbereit.

Insbesondere wegen der geplanten Beschleunigung polarisierter Elektronen wird eine bessere Closed-Orbit-Korrektur notwendig. So bestand die Aufgabe dieser Diplomarbeit darin, die notwendigen Schritte zu unternehmen, die Korrektur des Closed-Orbits an ELSA, insbesondere in der vertikalen Strahlebene, durchzuführen.

Diese Arbeit zeichnet sich durch ein breites Spektrum an Einzelthemen aus. Die folgende Gliederung soll einen Überblick über die behandelten Themen schaffen:

Im Kapitel 2 werden theoretische und algorithmische Aspekte zum Thema Closed-Orbit behandelt. Dabei wird mit einer knappen Einführung in die transversale Strahloptik begonnen, die Behandlung von Closed-Orbit-Störungen in diesem Modell beschrieben und Algorithmen für Orbitkorrekturen erläutert.

---

<sup>2</sup>RMS = Root Mean Square = Wurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abstände

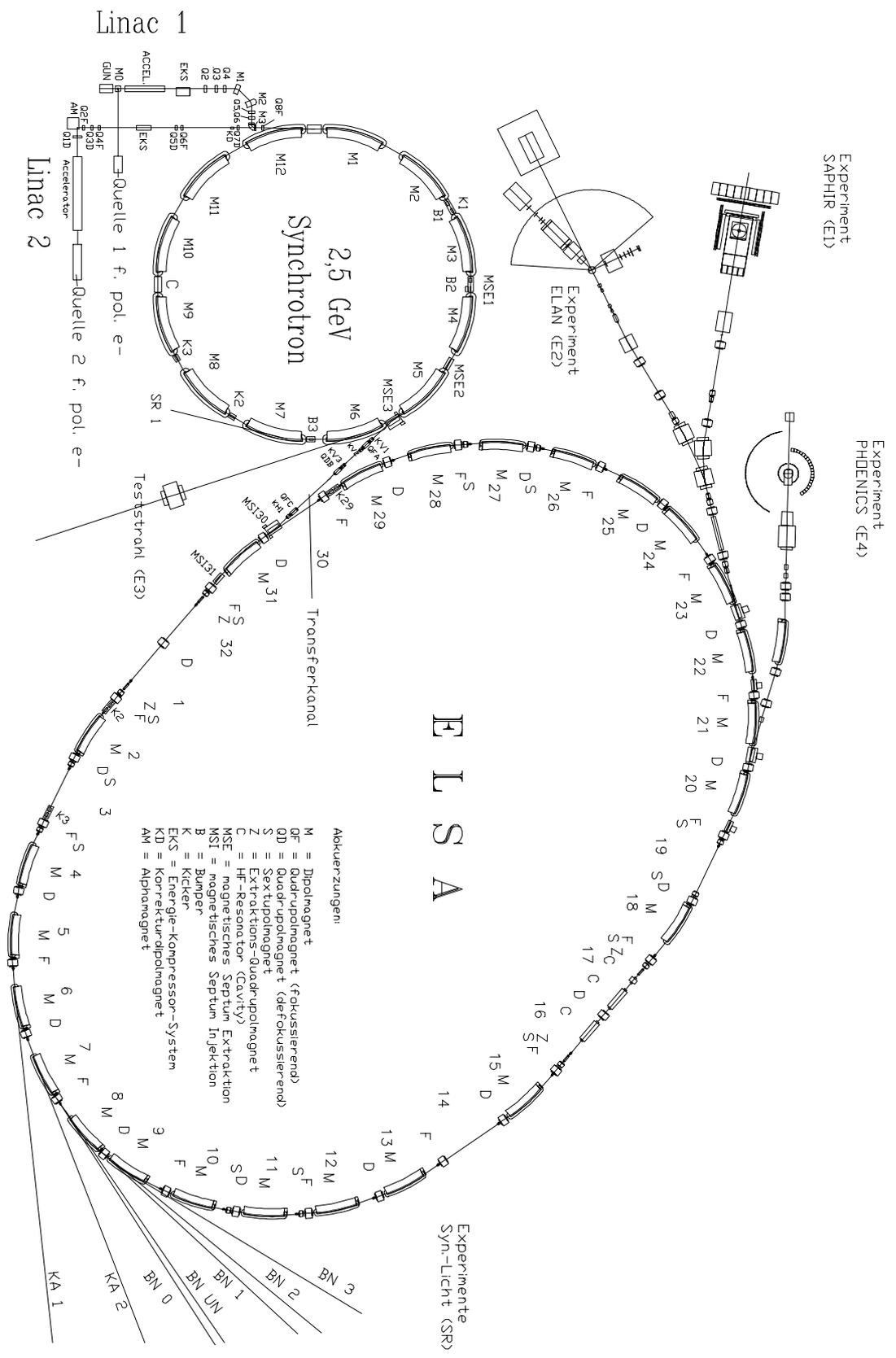


Abbildung 1.1: Die Beschleunigeranlage des Physikalischen Instituts

Das folgende Kapitel widmet sich Simulationen zum Closed-Orbit an ELSA. Es wurde bestimmt, mit welchen Orbitablagen durch Stell- und Feldfehler der Magnete zu rechnen ist, und wie gut verschiedene Algorithmen den Orbit mit der vorhandenen Monitor- und Korrektorbestückung korrigieren können. Diese Betrachtungen wurden sowohl global, als auch lokal durchgeführt.

Da in der Diplomarbeitszeit der Hardware-Aspekt der Orbitmessung stärkeres Gewicht bekam als zunächst vorgesehen, wird in einem Kapitel die Technik der ELSA-Strahllagemonitore vorgestellt. Die Entwicklung einer neuen Signalverarbeitungs-Elektronik wurde begonnen. Als alternative Meßmethode von Orbitablagen wurde die Quadrupol-Methode getestet.

Ein anderer Schwerpunkt der Arbeit lag in der Entwicklung von Software zur Closed-Orbit-Messung und -Korrektur. Dieses Thema wird in Kapitel 5 behandelt.

Darüberhinaus wurden eine Reihe von Messungen am Strahl zum Austesten der Monitore, der Korrekturen und der Korrektursoftware vorgenommen. Dafür wurden einfache Strahlmanipulationen durchgeführt. Die Abhängigkeit des Orbits von verschiedenen Betriebsparametern wurde untersucht. Die Ergebnisse der Messungen finden sich im Kapitel 6.

Im abschließenden Kapitel wird ein Ausblick auf künftige Anstrengungen zum Thema Closed-Orbit an ELSA gegeben.

# Kapitel 2

## Theorie und Algorithmen zur Closed-Orbit-Korrektur

### 2.1 Kurze Einführung in die transversale Strahloptik

Es folgt hier eine sehr knappe Einführung in die transversale Strahloptik, um häufig verwendete Bezeichnungen, Größen und Funktionen einzuführen.

#### 2.1.1 Das Beschleuniger-Koordinatensystem

Beim Entwurf eines Beschleunigers wird eine Sollbahn, der Design-Orbit, festgelegt, um die beispielsweise die magnetischen Elemente positioniert werden. Die Teilchen werden aber immer eine Abweichung von dieser Sollbahn besitzen, so daß ein fokussierendes System vorhanden sein muß, das die Teilchen in Richtung der Sollbahn bewegt. Eine starke Fokussierung erreicht man mit alternierenden Gradientenfeldern, die beispielsweise mit Quadrupolmagneten erzeugt werden.

Da mit einem fokussierenden System die Abweichungen von der Sollbahn relativ gering sind, wird für gewöhnlich in linearer Näherung gerechnet. Damit genügen zur vollständigen Beschreibung eines Teilchenzustandes drei Koordinaten und deren Ableitungen. Die Bewegung eines Teilchens von einem Ort im Beschleuniger zum anderen ist somit eine lineare Transformation.

Als Koordinaten wählt man meistens eine longitudinale Koordinate  $s$ , die die Position entlang des Design-Orbits beschreibt, und die transversalen Koordinaten  $x$  und  $z$ , die die horizontale bzw. vertikale Abweichung vom Design-Orbit beschreiben. Als Ableitung der longitudinalen Koordinate wird üblicherweise die relative Impulsabweichung  $\Delta p/p$  des Teilchens verwendet, und die Ableitungen der transversalen Koordinaten entsprechen in der linearen Näherung den Winkeln der Teilchen zur Sollbahn. Bild 2.1 illustriert das Koordinatensystem.

#### 2.1.2 Die transversalen Bahngleichungen

Zur Beschreibung der Teilchenbewegung im Beschleuniger setzt man die Lorentzkraft von elektrisch geladenen, bewegten Teilchen in elektromagnetischen Feldern an. Mit der Einschränkung auf nur transversal wirkende Magnetfelder, Multipolentwicklung der Magnetfelder und linearer Näherung erhält man die Bahngleichungen für die transversale Bewegung der Teilchen im Beschleuniger. Wegen der linearen Näherung spielen nur Dipol- und Quadrupolkomponenten der Magnetfelder eine Rolle. Die Dipole halten die Teilchen auf der Kreisbahn, während die Quadrupole die Fokussierung zur Aufgabe haben. Die Bahngleichungen lauten:

$$x''(s) + \left( \frac{1}{\rho^2(s)} - k(s) \right) x(s) = \frac{1}{\rho(s)} \frac{\Delta p}{p} \quad , \quad (2.1)$$

$$z''(s) + k(s)z(s) = 0 \quad (2.2)$$

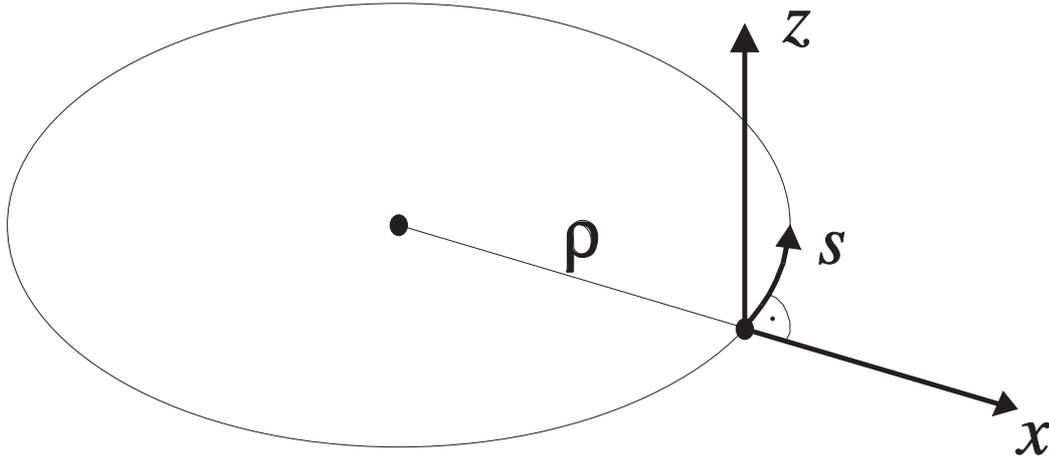


Abbildung 2.1: Das Beschleuniger-Koordinatensystem

mit:  $\rho(s)$ : Dipol-Krümmungsradius entlang des Rings  
 $k(s)$ : Quadrupol-Fokussierstärke entlang des Rings.

Diese Differentialgleichungen des Hill'schen Typs besitzen pseudoharmonische Lösungen, die üblicherweise in folgender Form notiert werden:

$$x(s) = \sqrt{\epsilon_x} \sqrt{\beta_x(s)} \cos(\psi_x(s) + \psi_{x0}) + D(s) \frac{\Delta p}{p} \quad , \quad (2.3)$$

$$z(s) = \sqrt{\epsilon_z} \sqrt{\beta_z(s)} \cos(\psi_z(s) + \psi_{z0}) \quad (2.4)$$

mit:  $\epsilon$ : Emittanz (wird nicht durch obige Differentialgleichungen bestimmt)

$\beta(s)$ : Beta-Funktion

$\psi(s)$ : Betatron-Phasenfunktion

$D(s)$ : Dispersionsfunktion (beschreibt Bahnänderungen durch Impulsabweichungen).

Diese pseudoharmonischen Schwingungen nennt man auch Betatronschwingungen. In der Horizontalen kommt der dispersive Anteil durch die unterschiedliche Ablenkung in den Dipolen bei unterschiedlichem Impuls zustande. Die Beta-Funktion ist periodisch mit dem Ringumfang  $L$ . Die Anzahl der Betatronschwingungen pro Umlauf bezeichnet man als Arbeitspunkt  $Q$ , d.h.

$$\beta(s + L) = \beta(s) \quad , \quad (2.5)$$

$$\psi(s + L) = \psi(s) + 2\pi Q \quad . \quad (2.6)$$

Außerdem kann man durch Einsetzen in die Differentialgleichungen zeigen, daß für die Funktionen  $\beta$  und  $\psi$  gilt:

$$\frac{1}{2}\beta(s)\beta''(s) - \frac{1}{4}\beta'(s)^2 + k(s)\beta(s)^2 = 1 \quad , \quad (2.7)$$

$$\psi(s) = \int_0^s \frac{d\sigma}{\beta(\sigma)} \quad . \quad (2.8)$$

### 2.1.3 Closed-Orbit-Störungen

Nun entspricht der reale Beschleuniger nur näherungsweise dem entworfenen. Es ist vielmehr mit unerwünschten Magnetfeldkomponenten zu rechnen. So entspricht z.B. ein transversal verschobenes Quadrupolfeld einer Überlagerung aus einem Quadrupol- und einem Dipolfeld, so daß die Strahlteilchen bei einem horizontal verschobenen Quadrupol bei jedem Umlauf durch die Dipolkomponente eine kleine Winkeländerung  $\delta x'$  (einen sogenannten Kick) erfahren. Die Winkeländerung ist in diesem Fall proportional zur Verschiebung des Quadrupols.

Man kann zeigen, daß normalerweise dennoch eine geschlossene Teilchenbahn existiert, der sogenannte *Closed-Orbit* (Gleichgewichtsbahn). Eine ihn beschreibende Formel läßt sich direkt aus der Bedingung einer geschlossenen Bahn herleiten [Talman][Autin73]. Meistens ist die Länge des Dipolfelds, das den Kick

erzeugt, vernachlässigbar klein gegen eine Betatronwellenlänge. Dann kann man die Auswirkung auf den Closed-Orbit mit diskreten Kicks nähern:

$$x_c(s) = \frac{\sqrt{\beta(s)\beta_K}}{2 \sin \pi Q} \cos(\pi Q - |\psi(s) - \psi_K|) \cdot \delta x' \quad (2.9)$$

mit:  $\beta(s)$ ,  $\beta_K$ : Beta-Funktionen am Ort  $s$  bzw. am Ort des Kicks

$\psi(s)$ ,  $\psi_K$ : Betatron-Phasen am Ort  $s$  bzw. am Ort des Kicks

$Q$ : Arbeitspunkt

$\delta x'$ : Kickwinkel.

Die einzelnen Strahlteilchen führen um diese Bahn ihre Betatronbewegung gemäß Gleichung (2.3) bzw. (2.4) aus, aber bei Betrachtung aller Teilchen mitteln sich die Betatronschwingungen aus, und bei einer im Mittel verschwindenden Impulsabweichung auch die Dispersionsbahnen, so daß makroskopisch der Teilchenstrahl diesen Closed-Orbit einnimmt. Typische durch einen Dipolkick resultierende Closed-Orbit-Störungen zeigt Abbildung 6.3.

## 2.2 Korrektur des Closed-Orbits

Zur Korrektur von Orbitstörungen ist zuerst einmal eine Messung der Lage des Closed-Orbits nötig. Dazu müssen an möglichst vielen Orten entlang des Beschleunigerrings Strahlraummonitore (in diesem Zusammenhang kurz: „Monitore“) vorhanden sein. Der durch die fehlerhafte Dipolfeldstruktur des Rings verbeulte Strahl soll dann durch zusätzliche Dipolfelder möglichst auf die Sollbahn zurückgeschoben werden. Diese zusätzlichen Dipolfelder werden normalerweise durch extra dafür vorgesehene kleine Korrektormagnete (kurz: „Korrektoren“) erzeugt. So sind in ELSA zur Zeit 23 Monitore, 17 Korrektoren für die Korrektur der horizontalen und 16 für die der vertikalen Strahlebene installiert.

Ein Algorithmus berechnet aus den Monitor-Messwerten die nötigen Korrektorstärken. Es befinden sich eine ganze Reihe unterschiedlicher Korrekturalgorithmen in der Anwendung, die sich zum Teil deutlich unterscheiden. Man kann sie aber nach einigen Grundstrategien ordnen.

Es gibt Algorithmen für lokale und globale Korrekturen. Für Ringabschnitte, in denen es vermehrt auf einen stabilen Orbit ankommt, also z.B. Synchrotronlicht-Quellgebiete, Extraktionsgebiete oder Wechselwirkungspunkte bei Collidern, ist oft eine präzise lokale Korrektur nötig. Man kann dafür geschlossene Orbitbeulen setzen, die entsprechend den Monitormessungen den Orbit auf die zentrale Sollachse bringen (für Synchrotronlicht) oder auch gezielt von der Sollachse wegbringen (zur Extraktion).

Einen Überblick über viele der gängigen Algorithmen gibt es in [Dinev90].

### 2.2.1 Lokale Orbitbeulen

In der Literatur findet man normalerweise die nötigen Berechnungen für einfache Beulen, bei denen an einem Punkt die Ablage des Strahls frei gewählt werden kann. Dafür sind im allgemeinen drei Korrektoren nötig. Mit einem vierten Korrektor kann man noch den Winkel des Strahls an diesem Punkt setzen (Bild 2.2). Zur Berechnung der Korrektorstärken lassen sich analytische Formeln herleiten [Wille92], [Dinev90], [Autin84].

Der Ansatz zur Berechnung dieser Formeln läßt sich allerdings ohne Probleme zur Berechnung allgemeinerer Orbitbeulen erweitern. Zur Illustration folgt hier der Ansatz für die Vier-Korrektor-Beule:

$$M_{K1 \rightarrow B} \begin{pmatrix} 0 \\ \delta x'_1 \end{pmatrix} + M_{K2 \rightarrow B} \begin{pmatrix} 0 \\ \delta x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_B \\ x'_B \end{pmatrix} \quad , \quad (2.10)$$

$$M_{K1 \rightarrow K4} \begin{pmatrix} 0 \\ \delta x'_1 \end{pmatrix} + M_{K2 \rightarrow K4} \begin{pmatrix} 0 \\ \delta x'_2 \end{pmatrix} + M_{K3 \rightarrow K4} \begin{pmatrix} 0 \\ \delta x'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\delta x'_4 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

mit:  $M_{a \rightarrow b}$ : Transfermatrix vom Ort  $a$  nach  $b$

$K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ,  $K4$ ,  $B$ : Orte der Korrektoren und der Randbedingung

$x_B$ ,  $x'_B$ : Randbedingungen

$\delta x'_1$ ,  $\delta x'_2$ ,  $\delta x'_3$ ,  $\delta x'_4$ : Gesuchte Korrektorkicks.

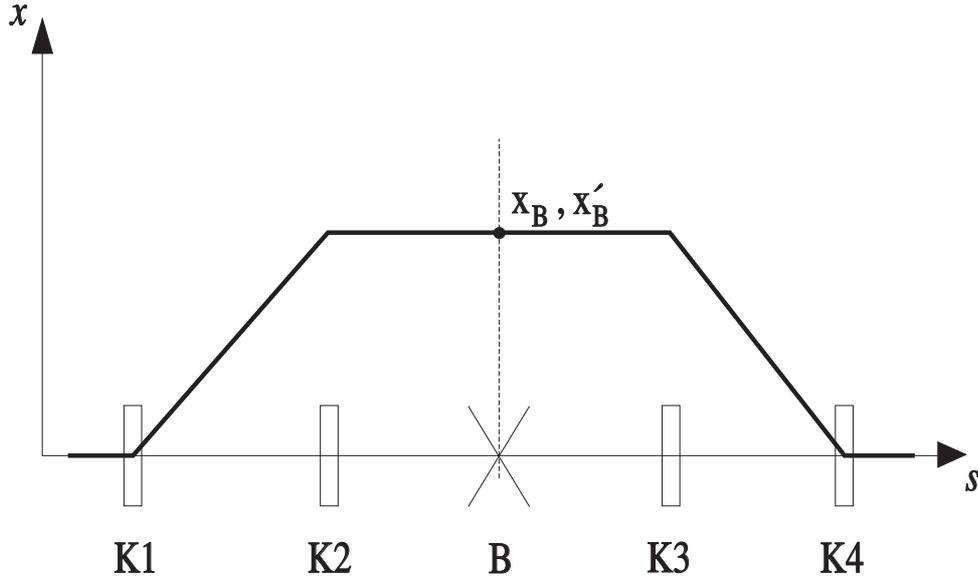


Abbildung 2.2: Eine schematische Vier-Korrektor-Beule (die tatsächliche Beulenform ist durch die Betatron-Schwingungen verändert; es kommt nur auf die Randbedingungen  $x_B$  und  $x'_B$  an)

Die erste Gleichung ist die Bedingung, am Ort B die gewünschte Ablage  $x$  und den gewünschten Winkel  $x'$  zu erhalten, wobei die beiden Summanden die Wirkungen der ersten beiden Korrektoren beschreiben; die zweite Gleichung ist die Bedingung zum Schließen der Beule.

Die Transfermatrizen beschreiben die lineare Teilchenbewegung zwischen zwei Orten im Beschleuniger. Sie werden durch die Magnetstruktur des Beschleunigers bestimmt; in diesem Zusammenhang ist die sogenannte Twiss-Form nützlich:

$$M_{A \rightarrow B} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\beta_B}{\beta_A}} (\cos \psi_{AB} + \alpha_A \sin \psi_{AB}) & \sqrt{\beta_A \beta_B} \sin \psi_{AB} \\ \frac{1}{\sqrt{\beta_A \beta_B}} ((\alpha_A - \alpha_B) \cos \psi_{AB} - (\alpha_A \alpha_B + 1) \sin \psi_{AB}) & \sqrt{\frac{\beta_A}{\beta_B}} (\cos \psi_{AB} - \alpha_B \sin \psi_{AB}) \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

mit:  $\alpha_A, \alpha_B$ : Alpha-Funktionen am Ort A bzw. B;  $\alpha(s) := -\frac{\beta'(s)}{2}$   
 $\beta_A, \beta_B$ : Beta-Funktionen am Ort A bzw. B  
 $\psi_{AB}$ : Phasenverschiebung von Ort A nach B.

Man hat also ein lineares Gleichungssystem mit vier Gleichungen zu lösen.<sup>1</sup> Dabei ist es allerdings nicht nötig, die expliziten, ziemlich länglichen Lösungsformeln aufzuschreiben, sondern man kann das Gleichungssystem für den speziellen Fall direkt durch Matrixinversion berechnen lassen. Das hat den Vorteil, daß man leicht Verallgemeinerungen machen kann. Im Prinzip lassen sich Orbitbeulen mit beliebig vielen Strahlablage- oder Strahlwinkel-Bedingungen innerhalb der Beule herstellen. Zusammen mit den beiden Bedingungen zum Schließen der Beule erhält man so ein lineares Gleichungssystem, das es zu lösen gilt. In allgemeiner Form besteht das Gleichungssystem aus folgenden Gleichungen:

$$\text{Für Ablagen als Randbedingungen: } \sum_{s_K < s_B} \sqrt{\beta_K \beta_B} \cdot \sin(\psi_B - \psi_K) \cdot \delta x'_K = x_B \quad .$$

$$\text{Für Winkel als Randbedingungen: } \sum_{s_K < s_B} \sqrt{\frac{\beta_K}{\beta_B}} \cdot (\cos(\psi_B - \psi_K) - \alpha_B \sin(\psi_B - \psi_K)) \cdot \delta x'_K = x'_B$$

$$\text{Zum Schließen der Beule: } \sum_K \sqrt{\beta_K \beta_{LK}} \cdot \sin(\psi_{LK} - \psi_K) \cdot \delta x'_K = 0 \quad ,$$

<sup>1</sup>Die optischen Funktionen  $\beta(s)$  und  $\psi(s)$  werden durch die Korrektorkicks allerdings leicht beeinflusst, so daß genau genommen ein nichtlineares Gleichungssystem vorliegt. Den Fehler, den man durch Vernachlässigung der Nichtlinearität macht, kann man durch iterative Anwendung der Beule verkleinern.

$$\sum_K \sqrt{\frac{\beta_K}{\beta_{LK}}} \cdot (\cos(\psi_{LK} - \psi_K) - \alpha_{LK} \sin(\psi_{LK} - \psi_K)) \cdot \delta x'_K = 0$$

mit:  $\beta_K, \psi_K$ : Beta-Funktion und Phase an einem Korrektorkorrektor

$\alpha_B, \beta_B, \psi_B$ : Alpha-Funktion, Beta-Funktion und Phase an einer Randbedingung

$\alpha_{LK}, \beta_{LK}, \psi_{LK}$ : Alpha-Funktion, Beta-Funktion und Phase am letzten Korrektorkorrektor

$x_B, x'_B$ : die Randbedingungen

$\delta x'_K$ : die gesuchten Korrektorstärken

$s_K < s_B$  bedeutet: Korrektoren, die vor der Randbedingung stehen.

Am Ort einer Randbedingung sind also die Wirkungen aller Korrektoren zu berücksichtigen, die *vor* der Randbedingung stehen. Das Gleichungssystem ist daher nur lösbar, wenn vor der  $n$ -ten Randbedingung der Beule mindestens  $n$  Korrektoren stehen. Natürlich ist es auch nicht lösbar, falls man an einem Ort zwei verschiedene Ablagen oder Winkel auf einmal haben möchte.

Andererseits kann man weitere Korrektoren hinzufügen, ohne die Zahl der Bedingungen zu erhöhen. Dadurch wird das Gleichungssystem unterbestimmt. Bei der Wahl eines geeigneten Verfahrens zur Matrixinversion lassen sich so die berechneten Korrektorstärken minimieren.

## 2.2.2 Globale Orbitkorrektur

Der theoretische Einfluß der Korrektoren auf die Strahlablagen an den Monitorpositionen ist nach Gleichung (2.9) gegeben. Dabei wird der Kick  $\delta x'$  von den Korrektoren erzeugt und ist (unterhalb der Sättigung des Magneten) proportional dem Korrektorstrom  $I$  und invers proportional zur Strahlenergie  $E$ :

$$\delta x' \sim I/E \quad . \quad (2.13)$$

Man kann die Einflüsse aller  $N_K$  Korrektoren auf die Strahlablagen an allen  $N_M$  Monitoren zu einer Matrix  $A$  zusammenfassen, der sogenannten Orbit-Response-Matrix. Der direkte Weg der Korrektur der Strahlablagen ist somit die Lösung des linearen Gleichungssystems

$$A \cdot \vec{k} = \vec{m} \quad (2.14)$$

mit:  $\vec{k}$ : Vektor der gesuchten Korrektorkicks

$\vec{m}$ : Vektor der an den Monitoren gemessenen Strahlablagen.

Die Orbit-Response-Matrix ist im allgemeinen nicht quadratisch ( $N_M \neq N_K$ ), so daß Gleichung (2.14) vor der Matrixinversion noch mit der Transponierten von  $A$  zu multiplizieren ist:

$$A^t A \cdot \vec{k} = A^t \cdot \vec{m} \quad , \quad (2.15)$$

$$\Leftrightarrow \vec{k} = (A^t A)^{-1} A^t \cdot \vec{m} \quad . \quad (2.16)$$

Es ist zu beachten, daß durch Umformung von (2.15) bei überbestimmten, also nicht exakt lösaren Gleichungssystemen (mehr Monitore als Korrektoren) die quadratische Norm minimiert wird:

$$(\vec{m} - A\vec{k})^2 = \sum_{i=1}^{N_M} (m_i - (A\vec{k})_i)^2 = \min \quad . \quad (2.17)$$

Diese Methode wird daher als Least-Square-Algorithmus (LSQ-Algorithmus) bezeichnet.

Zur Matrixinversion benutzt man gerne die Singular-Value-Decomposition-Methode (SVD-CMP), da diese bei rechteckigen Matrizen automatisch die Least-Square-Norm minimiert [Press92], und leicht die resultierenden Korrektorstärken minimiert werden können (siehe folgenden Abschnitt 2.2.3).

Es spielt übrigens keine Rolle, ob die Orbit-Response-Matrix mit Formel (2.9) aus der theoretischen Strahl-optik berechnet, oder einfach ausgemessen wurde. Letzteres ist vorzuziehen, da sonst Diskrepanzen zwischen theoretischer und tatsächlicher Strahl-optik die Korrektur verschlechtern. Normalerweise muß die Orbit-Response-Matrix sowieso ausgemessen werden, um die Proportionalitätsfaktoren für Gleichung (2.13) bestimmen zu können.

### 2.2.3 Minimierung der Korrektorstärken

Es zeigt sich, daß für die bestmögliche Korrektur oft größere Korrektorstärken nötig sind als sie von den Magneten geliefert werden können. So ist es sinnvoll, mit möglichst kleinen Abstrichen in der Korrekturgüte die Korrektorstärken zu minimieren. Dafür gibt es verschiedene Ansätze.

Die einfachste Art ist, in dem verwendeten SVDCMP-Verfahren relativ kleine Eigenwerte der Orbit-Response-Matrix herauszufiltern. Ein kleiner Eigenwert korrespondiert nämlich mit einer Korrektoreinstellung mit kleiner Wirkung auf den Orbit an den Monitorpositionen. Die Unterdrückung kleiner Eigenwerte läßt sich auch eleganter in den LSQ-Algorithmus integrieren [Friedman95].

Eine andere häufig benutzte Art ist die Harmonischen-Korrektur [Autin84]. Dafür wird zuerst das Beta-tron-Spektrum der Orbitablagen an den Monitoren betrachtet:

$$f_k = \sum_{i=1}^{N_M} \frac{m_i}{\sqrt{\beta_i}} \cdot e^{\psi_i/Q \cdot k \cdot j} \quad (2.18)$$

mit:  $m_i$ : Strahlablage am Monitor  $i$

$\beta_i, \psi_i$ : Betafunktion und Betatron-Phase am Monitor  $i$

$Q$ : Arbeitspunkt.

Durch Fouriertransformation der Hill'schen Differentialgleichung (2.1) kann man leicht zeigen, daß das Spektrum ein resonanzartiges Verhalten um den Arbeitspunkt zeigt, so daß eine selektive Korrektur von einigen wenigen, um den Arbeitspunkt verteilten Harmonischen den Orbit effektiv korrigiert. Ein weiterer Vorteil ist, daß ein Rauschen in den Orbitmeßwerten die Korrektur weniger beeinflußt, da das Rauschspektrum im Frequenzraum gleichverteilt ist. Das Rauschen hat daher bei den Harmonischen ferner vom Arbeitspunkt einen größeren Anteil.

Sehr verbreitet ist auch der MICADO-Algorithmus [Autin73], der mit folgender Strategie die Korrektorstärken in Grenzen hält: in einzelnen Iterationsschritten wird der zur Orbitkorrektur effektivste Korrektor ausgewählt, indem ein Least-Square-Fit des gemessenen Orbits an die einzelnen Korrektor-Response-Orbits durchgeführt wird. Die Korrektur wird berechnet, und sukzessive ein weiterer Korrektor hinzugenommen. Dabei kann man den Algorithmus nach einer beliebigen Anzahl von Iterationsschritten abbrechen lassen, so daß die ineffektiven Korrektoren, die große Kicks machen müßten, gar nicht erst verwendet werden. Ein weiterer Vorteil der MICADO-Methode ist die relativ kurze Rechenzeit, die der Algorithmus in Anspruch nimmt, und ist somit an großen Beschleunigern beliebt. Das ist bei den heutigen Rechnerleistungen allerdings nebensächlich geworden.

Bei großen Orbitablagen, die zu großen Korrektorstärken führen, ist es sinnvoll, die Ursachen der Orbitstörungen zu beseitigen, z.B. die Quadrupol-Stellfehler. Mit den gleichen Algorithmen kann man ohne weiteres statt Korrektorstärken auch hypothetische Quadrupol-Stellfehler ausrechnen. Allerdings muß man sich darüber im klaren sein, daß die berechneten Stellfehler nicht den realen entsprechen müssen, da es im Beschleunigerring wesentlich mehr Orbit-Störquellen gibt als Monitore (im Prinzip jeder Magnet); man hat also ein stark unterbestimmtes Gleichungssystem. Um mehr Informationen über den Orbit zu erhalten, ist es möglich, Beschleunigerparameter (z.B. die Arbeitspunkte) gezielt zu verändern und neue Orbitmessungen durchzuführen [Dinev90]. Allerdings müssen die Änderungen der Beschleunigerparameter groß genug sein, um deutliche Auswirkungen auf den Orbit sehen zu können.

### 2.2.4 Weitere Optimierungs-Algorithmen

Ein wesentlicher Nachteil der bisher beschriebenen Algorithmen ist, daß sie von rein linearen Verhältnissen ausgehen. Dies entspricht der Realität nicht unbedingt, so besitzen z.B. die Korrektoren nichtlineare, hysteresebefahete Strom-Magnetfeld-Kurven. Außerdem weisen die Monitormeßwerte und Korrektoren Rauschen und Langzeitdriften auf.

Diese Unwägbarkeiten äußern sich darin, daß nach einer Korrektur der Orbit nicht wie gewünscht optimal ist. Normalerweise führt man deshalb mehrere Iterationen durch. Die Praxis zeigt, daß nach drei bis vier aufeinander aufbauenden Korrekturen der Orbit nicht mehr verbessert werden kann; weitere Iterationen ändern den Orbit jeweils nur noch geringfügig.

Dies kann wiederum für Feedback-Systeme, bei denen der Orbit ständig korrigiert wird, nachteilig sein, da dem Orbit so ein leichtes Rauschen aufgeprägt wird. Abhilfe könnten andersartige Korrekturalgorithmen

schaffen, die einen gewissen Lerneffekt besitzen. Hier gibt es vielfältige neuartige Ansätze, z.B. neuronale Netze [Friedman94] und adaptive Filter [Manukian93][Picard95]. Diese adaptiven Systeme können sich Langzeitdriften der Monitore und Korrektoren anpassen, das Systemrauschen erkennen und unterdrücken, sie arbeiten nichtlinear, und sie haben zum Teil die Fähigkeit, sich nicht in einem lokalen Optimum zu verfangen, sondern das absolute zu finden.

Es ist interessant, daß diesen Algorithmen (in der Grundform) keinerlei physikalisches Wissen als Grundlage dient, was diese sehr flexibel auch für gänzlich andere Anwendungen macht. Es ist in der Praxis allerdings nötig, diesen Systemen in einer Lernphase ein gewisses Grundwissen zu vermitteln, damit sie zu Beginn keine unsinnigen Resultate liefern oder sich in die falsche Richtung entwickeln. Man kann ein neuronales Netz z.B. mit Ergebnissen des Least-Square-Algorithmus trainieren.

# Kapitel 3

## Simulationen zum Closed-Orbit und dessen Korrektur

Die künftigen Anforderungen an die Güte des Closed-Orbits sind ziemlich streng; so wird in [Jessenberger93] von einem RMS-Wert von  $390 \mu\text{m}$  für den vertikalen Orbit ausgegangen. Um zu entscheiden, ob dieser Wert mit der vorhandenen Monitor- und Korrektorkonfiguration überhaupt zu erreichen ist, wurden Simulationen mit MAD (*Methodical Accelerator Design*, [Grote95]) durchgeführt. Alle folgenden Simulationen wurden bei den Arbeitspunkten  $Q_x=4.658$  und  $Q_z=4.617$  gemacht.

### 3.1 Einfluß von statistischen Stell- und Feldfehlern auf den Closed-Orbit

Mit MAD lassen sich leicht Stell- und Feldfehler in die Magnetstruktur einbinden (*calign*- und *efield*-Kommandos). Damit wurde untersucht, wie sich die einzelnen Stell- und Feldfehler der Hauptmagnete auf den Closed-Orbit auswirken.

Da die realen Stell- und Feldfehler nicht bekannt sind, sondern nur statistische Fehlergrenzen ermittelbar sind (basierend auf den Meßgenauigkeiten beim Justieren der Hauptmagnete), kann man nicht die Lage des Closed-Orbits vorhersagen. Man kann aber Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Größe der Closed-Orbit-Störungen ermitteln. Dazu wurden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt.

Es gibt auch analytische Ansätze, um die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Closed-Orbit-Amplituden bei gegebenen Fehlerverteilungen für die Ringelemente zu berechnen, aber diese liefern erst unter relativ großem Aufwand befriedigende Ergebnisse [Gluckstern78].

#### 3.1.1 Vergleich verschiedener Stellfehler

Um zu bestimmen, welche Fehlerquellen in ELSA dominieren, wurden Simulationen mit je 1000 Zufalls-konfigurationen durchgeführt. Die verwendeten Stellfehler sind Sigma-Werte einer Gauß-Verteilung nach [Schauerte90] und [Schauerte95], die Feldfehler sind Abschätzungen gemäß [Krauss86] und [Zimmer86]:

Quadrupole:  $\Delta x = \Delta z = 0.2 \text{ mm}$   
 $\Delta s = 3 \text{ mm}$   
 $\Delta \varphi = \Delta \vartheta = \Delta \psi = 0.3 \text{ mrad}$   
 $\Delta k/k = 5 \cdot 10^{-4}$ ,

Dipole:  $\Delta x = \Delta z = 1 \text{ mm}$   
 $\Delta s = 0.5 \text{ mm}$   
 $\Delta \varphi = \Delta \vartheta = 2 \text{ mrad}$   
 $\Delta \psi = 0.5 \text{ mrad}$   
 $\Delta B/B = 5 \cdot 10^{-4}$ ,

Elemente	Sigma-Fehler	Beeinflusste Ebene	RMS-Wert [mm]	Max.-Wert [mm]
Quadrupole	$\Delta x = 0.2$ mm	horizontal	$1.32 \pm 0.42$	$3.40 \pm 1.01$
	$\Delta z = 0.2$ mm	vertikal	$1.10 \pm 0.35$	$3.17 \pm 0.97$
	$\Delta \varphi = 0.3$ mrad	vertikal	$0.41 \pm 0.13$	$1.19 \pm 0.36$
	$\Delta \vartheta = 0.3$ mrad	horizontal	$0.50 \pm 0.16$	$1.28 \pm 0.38$
Dipole	$\Delta x = 1$ mm	horizontal	$0.14 \pm 0.05$	$0.36 \pm 0.11$
	$\Delta z = 1$ mm	vertikal	$0.34 \pm 0.12$	$0.97 \pm 0.30$
	$\Delta s = 0.5$ mm	horizontal	$0.54 \pm 0.19$	$1.37 \pm 0.43$
	$\Delta \varphi = 2$ mrad	vertikal	$0.23 \pm 0.08$	$0.65 \pm 0.21$
	$\Delta \psi = 0.5$ mrad	vertikal	$1.88 \pm 0.64$	$5.31 \pm 1.67$
	$\Delta B/B = 5 \cdot 10^{-4}$	horizontal	$1.95 \pm 0.68$	$5.01 \pm 1.63$

Tabelle 3.1: Resultate der Monte-Carlo-Simulationen mit je einer Fehlerquelle (Mittelwerte und Standardabweichungen der resultierenden Verteilungen)

mit:  $\Delta x$ ,  $\Delta z$ ,  $\Delta s$ : Verschiebungen der Elemente in Richtung der Achsen  $x$ ,  $z$  und  $s$   
 $\Delta \varphi$ ,  $\Delta \vartheta$ ,  $\Delta \psi$ : Verkippungen der Elemente um die Achsen  $x$ ,  $z$  und  $s$   
 $\Delta B/B$ ,  $\Delta k/k$ : Relative Dipol- bzw. Quadrupol-Feldfehler.

Tabelle 3.1 zeigt die Resultate. Nicht aufgeführte Fehler sind vernachlässigbar. Man erkennt, daß transversale Quadrupol-Stellfehler, Kippfehler der Dipole um die  $s$ -Achse und Dipol-Feldfehler am kritischsten sind.

Quadrupol-Feldfehler haben keinen *direkten* Einfluß auf den Closed Orbit, bewirken aber Arbeitspunktverschiebungen. Dadurch werden Closed-Orbit-Störungen, die durch andere Fehlerquellen verursacht werden, geringfügig beeinflusst.

### 3.1.2 Alle Fehlerquellen zusammen

Sämtliche Fehlerquellen wurden in einer großen Monte-Carlo-Simulation mit 10000 Zufallskonfigurationen zusammengenommen.

Resultat:

$$\begin{array}{ll}
 x_{rms} = (2.47 \pm 0.83) \text{ mm} & z_{rms} = (2.24 \pm 0.73) \text{ mm} \\
 x_{max} = (6.37 \pm 1.98) \text{ mm} & z_{max} = (6.40 \pm 1.98) \text{ mm} \\
 Q_x = 4.658 \pm 0.002 & Q_z = 4.617 \pm 0.001 \quad .
 \end{array}$$

Obwohl für die horizontale und vertikale Strahlebene die Hauptfehlerquellen verschieden sind, ergeben sich nahezu identische Verteilungen an Closed-Orbit-Störungen.

## 3.2 Closed-Orbit-Korrektur an ELSA

Der nächste Schritt nach der Simulation von gestörten Closed-Orbits ist die Korrektur dieser. Dazu wurde in weiteren Simulationen zuerst ein gestörter Closed-Orbit erzeugt und die Orbitablagen an den Monitorpositionen bestimmt. Ein aus MAD ausgelagerter Korrekturalgorithmus berechnet daraus Kickstärken für die Korrektormagnete (MAD besitzt nur den MICADO-Algorithmus, so daß für andere Algorithmen ein externes Programm die Korrekturen berechnen muß). Diese Kickstärken werden mit in die Simulation aufgenommen und dann der korrigierte Closed-Orbit simuliert.

Je nach Simulationszweck werden entweder die korrigierten Orbits gespeichert, oder eine Statistik über die RMS- bzw. Maximal-Orbitablagen vor und nach der Korrektur angelegt.

In den Simulationen wurden auch Stellfehler der Korrektoren und Monitore berücksichtigt. Korrektorstellfehler sind aber vergleichsweise unkritisch. Selbst Tests mit

$$\begin{array}{l}
 \Delta x = \Delta z = \Delta s = 10 \text{ mm} , \\
 \Delta \varphi = \Delta \vartheta = \Delta \psi = 10 \text{ mrad}
 \end{array}$$

ergaben in der Simulation unerwünschte Orbitstörungen von nur ca. 0.02 mm.

Die transversalen Monitor-Stellfehler werden in ELSA mit einer Genauigkeit von ca. 0.2 mm relativ zu den Quadrupolen ausgemessen, so daß die Stellfehler der Quadrupole quadratisch dazuaddiert werden müssen; dies ergibt ca. 0.3 mm.

### 3.2.1 Verteilung der Korrektoren auf die beiden Strahlebenen

Es sind 33 Korrektoren im Ring eingebaut, die jeweils nur auf eine Strahlebene wirken können, teilweise in Paaren. So ist an 24 Stellen mindestens ein Korrektor vorhanden. Zu Beginn der Diplomarbeit waren alle Korrektoren für die Orbit-Korrektur in der horizontalen Ebene eingestellt. Es wurde eine günstige Verteilung ermittelt, bei der die Hälfte auf die horizontale bzw. auf die vertikale Strahlebene wirkt, ohne daß eine nennenswerte Verschlechterung der Korrektur des horizontalen Orbits zu erwarten ist.

Dazu wurde eine Untersuchung mit MICADO-Korrekturen durchgeführt. Dabei sollte der Algorithmus die für eine Menge zufälliger Orbitprobleme jeweils effektivsten Korrektoren auswählen. Die dadurch bestimmte Korrektorverteilung stellte sich im Vergleich zu anderen getesteten Verteilungs-Bestimmungsmethoden als günstigste heraus:

horizontal: Halbzellen 1, 3, 4, 6, 7, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 24, 25, 27, 30, 32 ,

vertikal: Halbzellen 1, 3, 5, 9, 10, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 26, 28, 30, 32 .

Die folgenden Simulationen wurden mit dieser Korrektorverteilung durchgeführt.

### 3.2.2 Vergleich verschiedener Korrekturalgorithmen

Es wurden Orbitkorrekturen mit verschiedenen Algorithmen simuliert: Least-Square-Korrektur, Harmonischen-Korrektur und MICADO mit verschiedenen Korrektorzahlen. Es wurden je 1000 Zufallskonfigurationen simuliert. Die Bilder 3.1 und 3.2 zeigen die Verteilungen an horizontalen und vertikalen maximalen Orbitablagen vor und nach Korrektur für die verschiedenen Korrekturalgorithmen.

Es fällt auf, daß der Least-Square-Algorithmus (wie zu erwarten) den Orbit an den Monitorpositionen am besten korrigiert (auf 360  $\mu\text{m}$  horizontal und 350  $\mu\text{m}$  vertikal RMS), aber der Orbit als Ganzes deutlich schlechter korrigiert wird (auf 530  $\mu\text{m}$  horizontal und 770  $\mu\text{m}$  vertikal RMS), und das von allen Algorithmen ungefähr gleich. Dies ist rund doppelt soviel, wie in [Jessenberger93] angenommen. Die Ursache für dieses schlechte Verhalten erkennt man, wenn man eine Menge von korrigierten Orbits in einem Diagramm darstellt (Bild 3.3).

In den Gebieten im Ring, wo über eine längere Strecke kein Monitor vorhanden ist, treten unkontrollierte, zum Teil recht große Orbitbeulen auf. Das sind im wesentlichen der Abschnitt, in dem Synchrotronlicht-Strahlrohre installiert sind, und das Gebiet der Strahlextraktion. Hier wurden aus Platzgründen bisher keine Monitore eingebaut.

Die Korrektur-Algorithmen können natürlich nur die Ablagen an den Monitorpositionen minimieren, und das, indem sie die gemessenen Orbitablagen durch Kicks an den Korrektorpositionen (mit entgegengesetztem Vorzeichen) nachbilden. Das Verhalten des Orbits *zwischen* den Monitoren hängt dabei vom Abstand der Monitore zueinander ab. Ist der Abstand zwischen zwei Monitoren zu groß, können die unkontrollierten Orbitbeulen auftreten.

Frühere Simulationen, in denen die gestörten Orbits nicht durch Stellfehler, sondern durch gewürfelte Korrektorkicks erzeugt wurden [Wenzel90], konnten dieses Verhalten nicht aufdecken. Die von den Korrekturalgorithmen berechneten Korrektorkicks gleichen bei dieser Methode die den gestörten Closed-Orbit erzeugenden Kicks aus, so daß am Ende kleinere Störungen vorhanden sind. In der Realität allerdings kommen die Korrektorkicks zu den eigentlich den gestörten Closed-Orbit erzeugenden Stell- und Feldfehlern hinzu, so daß also am Ende mehr Störungen vorhanden sind, die sich nur an den Monitorpositionen ausgleichen.

Wenn man den Algorithmen geringere Toleranzen aufzwingt (mehr Magnete beim MICADO-Algorithmus, bzw. kleinere Eigenwert-Grenzen bei den beiden anderen Algorithmen), wird dieses Verhalten noch deutlicher. Die Orbitbeulen äußern sich auch in besonders großen Korrektorstärken. Man muß also einen Kompromiß zwischen Minimierung der Orbitablagen und Minimierung der Korrektorstärken finden. Kleine Korrektorstärken gewährleisten, daß die unkontrollierten Beulen nicht zu groß werden.

Untersuchungen zeigten, daß der MICADO-Algorithmus die besten Resultate mit 7 bis 8 Korrektoren liefert, während  $10^{-2}$  eine vernünftige Eigenwert-Grenze für die Matrixinversions-Algorithmen ist.

Die vernünftigste Art, diese Orbitbeulen zu verhindern, ist das Einbauen von Monitoren an den entsprechenden Positionen. Aus Platzmangel war dies bisher nicht möglich, es steht aber ein neues Design für die Pickup-Elektroden der Monitore zur Verfügung, das den Einbau in die Quadrupole ermöglicht. Ein Aufstocken der Monitorbestückung ist in Arbeit. Es ist zu erwarten, daß die „Lücken“ in der Monitorbestückung im Laufe des nächsten Jahres geschlossen werden.

Algorithmus	$x_{rms}$ [mm]	$x_{max}$ [mm]	$z_{rms}$ [mm]	$z_{max}$ [mm]
vor Korrektur	$2.64 \pm 0.91$	$5.28 \pm 1.88$	$2.06 \pm 0.69$	$4.46 \pm 1.99$
Least Square	$0.36 \pm 0.17$	$0.74 \pm 0.51$	$0.35 \pm 0.13$	$0.71 \pm 0.40$
MICADO 7 Magnete	$0.56 \pm 0.19$	$1.11 \pm 1.99$	$0.43 \pm 0.12$	$0.88 \pm 0.38$
MICADO 8 Magnete	$0.50 \pm 0.16$	$0.98 \pm 0.49$	$0.40 \pm 0.11$	$0.80 \pm 0.37$
Harmonische 2-7	$0.76 \pm 0.23$	$1.30 \pm 0.59$	$0.86 \pm 0.36$	$1.66 \pm 0.89$

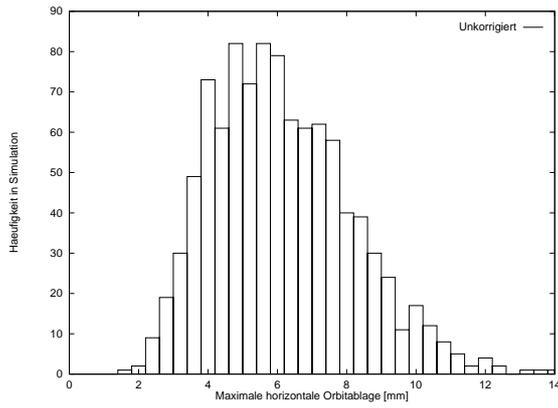
Tabelle 3.2: Korrekturergebnisse an den Monitorpositionen

Algorithmus	$x_{rms}$ [mm]	$x_{max}$ [mm]	$z_{rms}$ [mm]	$z_{max}$ [mm]
vor Korrektur	$2.45 \pm 0.85$	$6.33 \pm 2.01$	$2.19 \pm 0.72$	$6.30 \pm 1.99$
Least Square	$0.53 \pm 0.19$	$2.15 \pm 1.16$	$0.77 \pm 0.24$	$3.31 \pm 1.25$
MICADO 7 Magnete	$0.65 \pm 0.21$	$2.37 \pm 1.29$	$0.77 \pm 0.26$	$3.24 \pm 1.33$
MICADO 8 Magnete	$0.62 \pm 0.24$	$2.33 \pm 1.46$	$0.75 \pm 0.29$	$3.24 \pm 1.52$
Harmonische 2-7	$0.76 \pm 0.22$	$2.20 \pm 0.81$	$1.14 \pm 0.43$	$3.76 \pm 1.48$

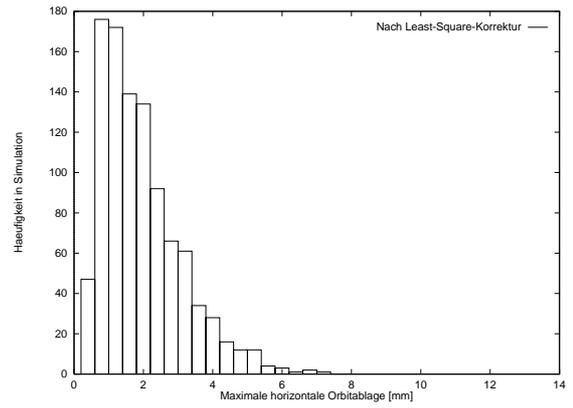
Tabelle 3.3: Korrekturergebnisse der Orbits global

Algorithmus	$\delta x'_{rms}$ [mrad]	$\delta x'_{max}$ [mrad]	$\delta z'_{rms}$ [mrad]	$\delta z'_{max}$ [mrad]
Least Square	$0.20 \pm 0.05$	$0.48 \pm 0.16$	$0.27 \pm 0.08$	$0.63 \pm 0.23$
MICADO 7 Magnete	$0.28 \pm 0.19$	$0.48 \pm 0.39$	$0.34 \pm 0.19$	$0.60 \pm 0.35$
MICADO 8 Magnete	$0.27 \pm 0.23$	$0.50 \pm 0.52$	$0.34 \pm 0.25$	$0.63 \pm 0.49$
Harmonische 2-7	$0.16 \pm 0.05$	$0.42 \pm 0.14$	$0.29 \pm 0.09$	$0.63 \pm 0.25$

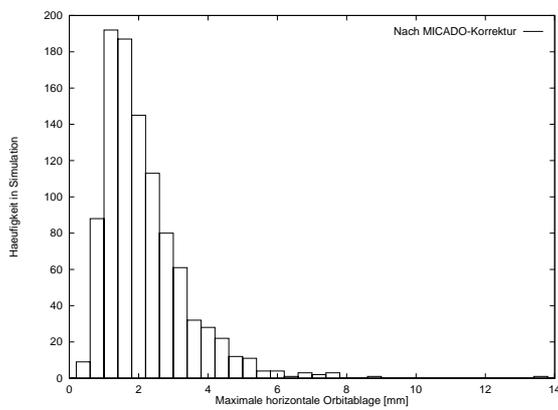
Tabelle 3.4: Kickstärken der verwendeten Korrektoren



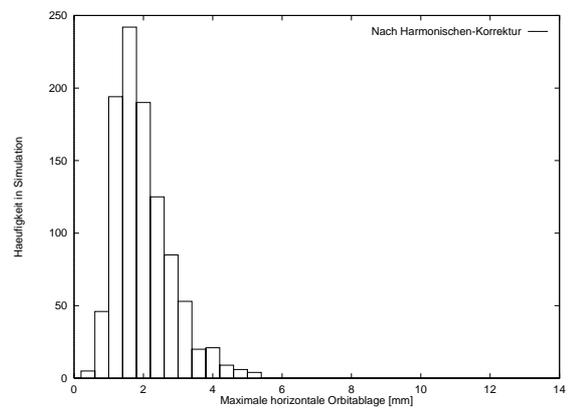
(a) Ohne Korrektur



(b) Least-Square-Korrektur

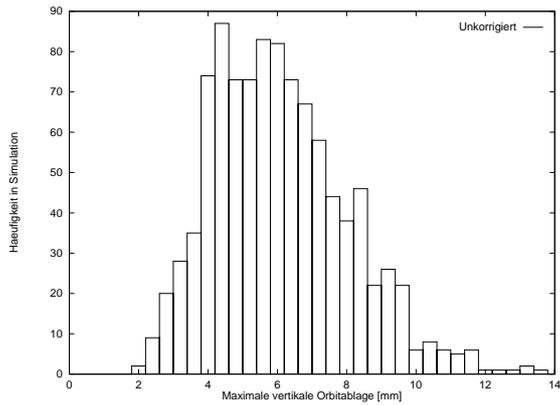


(c) MICADO-Korrektur

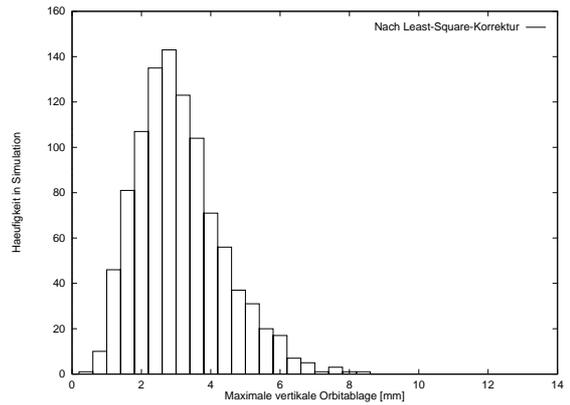


(d) Harmonischen-Korrektur

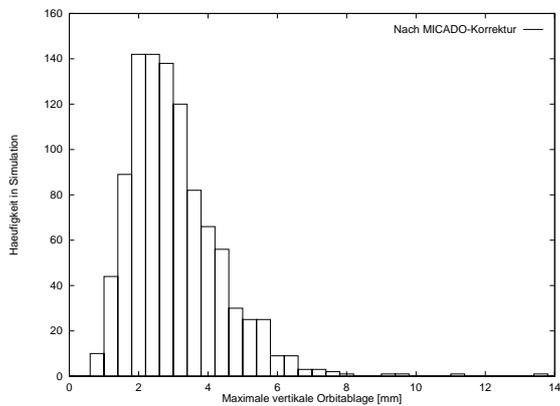
Abbildung 3.1: Maximale horizontale Orbitablagen vor und nach Korrektur



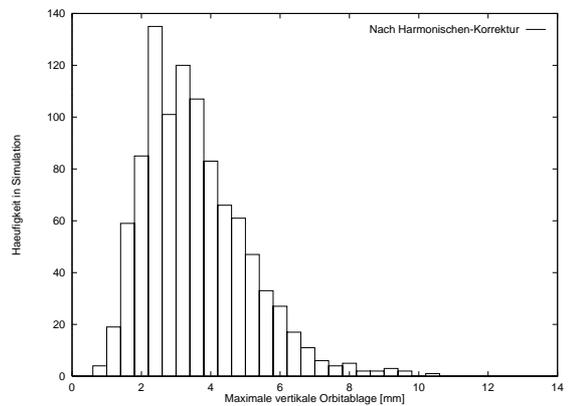
(a) Ohne Korrektur



(b) Least-Square-Korrektur

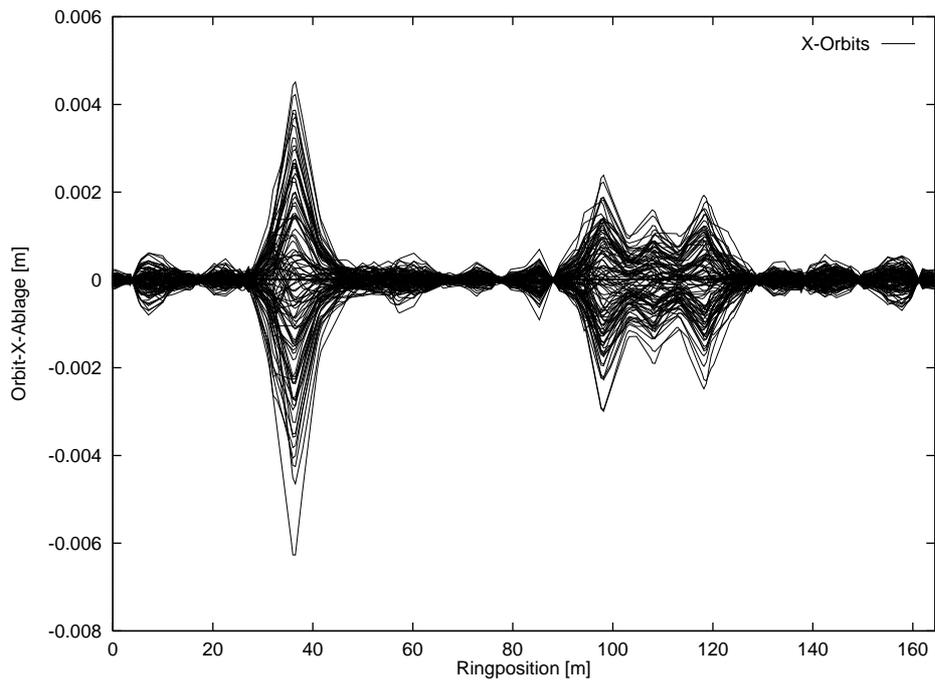


(c) MICADO-Korrektur

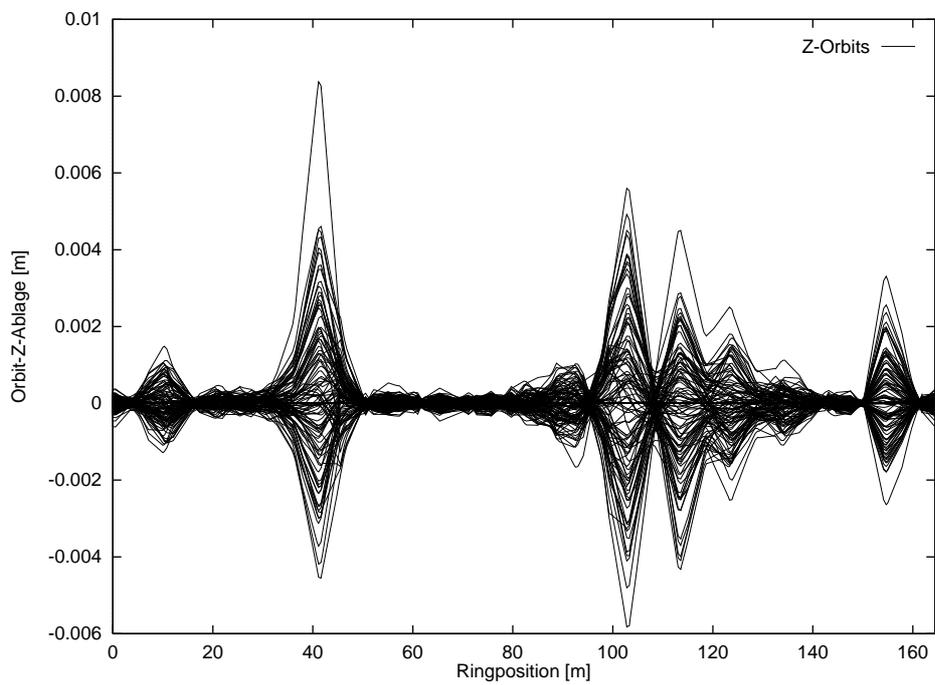


(d) Harmonischen-Korrektur

Abbildung 3.2: Maximale vertikale Orbitablagen vor und nach Korrektur



(a) Horizontal



(b) Vertikal

Abbildung 3.3: Je 100 least-square-korrigierte Orbits

# Kapitel 4

## Closed-Orbit-Messung

In diesem Kapitel wird die Messung des Closed-Orbits behandelt. Dabei wird auf die Technik von Strahlungsmotoren und insbesondere auf die signalverarbeitende Elektronik eingegangen. Außerdem werden Methoden der Nullpunktseichung von Monitoren vorgestellt: die Quadrupol- und die Pulsed-Wire-Methode.

### 4.1 Strahlungsmotoren

Es gibt verschiedene Typen von Strahlungsmotoren, beispielsweise Wandstrom-, Stripline- und Button-Motoren. Diese drei Typen nutzen die sich bewegenden elektromagnetischen Felder des Strahls aus. In ELSA werden Button-Motoren verwendet, das sind Motoren mit je vier kapazitiven Pickup-Elektroden in Knopfform (Abbildung 4.1). Die elektrischen Felder des Elektronenstrahls induzieren zeitlich veränderliche Ladungen, und damit Ströme auf den Elektroden. Die Elektroden sind mit Impedanzen abgeschlossen, so daß die Ströme als Spannungen über den Impedanzen gemessen werden können.

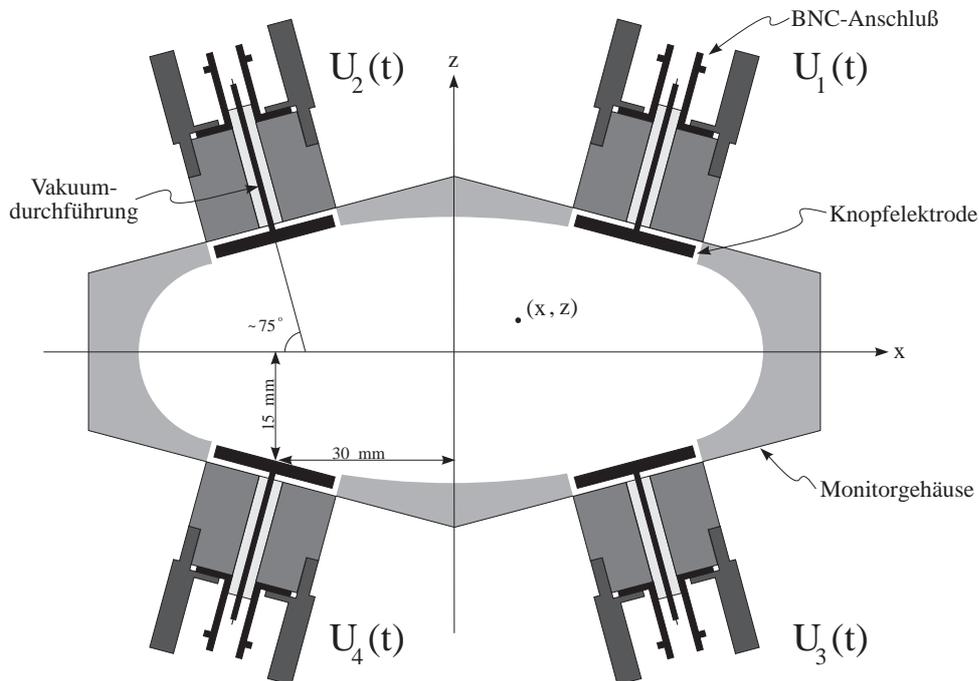


Abbildung 4.1: Querschnitt durch einen ELSA-Knopf-Monitor (die Zeichnung wurde freundlicherweise von J. Keil zur Verfügung gestellt)

Ein ruhendes Elektron besitzt ein radial gerichtetes, isotropes elektrisches Feld und kein Magnetfeld. Die Feldverteilungen für bewegte Elektronen erhält man durch Lorentz-Transformation; man kann so zeigen, daß das elektrische Feld zu einer Scheibe in longitudinaler Richtung mit einem Öffnungswinkel

von  $\Theta = \pm 1/\gamma$  kontrahiert wird, und ein Magnetfeld entsteht. Bei an ELSA typischen Energien ist  $\gamma$  sehr groß (bei 2.3 GeV ca. 4500), man kann also von einem rein transversalen Feld sprechen.

Die Felder der Strahlelektronen überlagern sich, so daß sich die Stärke des elektrischen Feldes an der Kammerwand mit der longitudinalen Intensitätsverteilung des Strahls ändert.

Durch eine metallische Vakuumkammer wird die Feldverteilung weiter beeinflusst, da die Feldlinien senkrecht auf der Wand stehen müssen. Ein nicht zentrierter Elektronenstrahl erzeugt eine asymmetrische Feldverteilung, insbesondere ist die Stärke des Signals an den vier Elektroden verschieden: Je näher der Strahl an einer Elektrode verläuft, desto stärker ist das Signal dort.

Die an den Elektroden induzierten Spannungen hängen also von der Strahlage, von der Kammergeometrie, von der Strahlintensität, und der Zeitstruktur des Elektronenstrahls ab.

Letztere ist durch die Bunch- und durch die Füllstruktur gegeben. Damit besitzt das Frequenzspektrum der induzierten Spannungen als wesentliche Komponente die Frequenz der beschleunigenden HF  $f_{HF}$  (bei ELSA 499.673 MHz), mit Seitenbändern im Abstand der Umlauffrequenz  $f_{HF}/h$  ( $h$  ist die Harmonischenzahl, bei ELSA 274, und damit ist die Umlauffrequenz hier 1.824 MHz).

Für eine Closed-Orbit-Messung interessiert nicht diese zeitliche Struktur des Spannungssignals, man möchte vielmehr den Mittelwert im Zeitbereich von Millisekunden bis Sekunden gewinnen. Die Aufgabe einer signalverarbeitenden Elektronik besteht also darin, aus dem Spannungssignal die Frequenz  $f_{HF}$  zu isolieren, gleichzurichten, mit einem Tiefpaß zu filtern (zu mitteln), und in eine für den Computer lesbare Form umzuwandeln.

Hat man vier Signalstärken  $U_1, U_2, U_3$  und  $U_4$  gewonnen, kann man aus diesen Signalen die Strahlintensität und die Strahlage (horizontal und vertikal) rekonstruieren. Dies sind drei freie Parameter; im Endeffekt ist eine der vier Signalstärken also durch die drei anderen bestimmt. Daher betrachtet man normalerweise die reduzierten Meßgrößen

$$\Sigma = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \quad (\text{Summensignal}), \quad (4.1)$$

$$\Delta_x = U_1 + U_3 - U_2 - U_4 \quad (\text{Differenzsignal horizontal}), \quad (4.2)$$

$$\Delta_z = U_1 + U_2 - U_3 - U_4 \quad (\text{Differenzsignal vertikal}). \quad (4.3)$$

Da alle Größen proportional zur Strahlintensität sind und man in diesem Zusammenhang nur an der Strahlage interessiert ist, dividiert man die beiden Differenzsignale durch das Summensignal:

$$Quot_x = \Delta_x/\Sigma \quad (\text{Quotient horizontal}), \quad (4.4)$$

$$Quot_z = \Delta_z/\Sigma \quad (\text{Quotient vertikal}). \quad (4.5)$$

Nun muß man noch den Zusammenhang zwischen diesen Quotienten und der Strahlage kennen, um letztere berechnen zu können. Dieser Zusammenhang wird durch die Kammergeometrie bestimmt, und ist im allgemeinen nichtlinear und nicht analytisch zu berechnen (Lediglich in einem kleinen Bereich um die Kammermitte ist der Zusammenhang linear). Er muß vermessen, oder mit geeigneten Programmen numerisch bestimmt werden.

Zur Vermessung wird üblicherweise ein Eichtisch verwendet, auf dem ein Stück der Kammer mit Knopfelektroden aufgebaut ist. Der Elektronenstrahl wird dabei mit einer mit Hochfrequenz gespeisten Antenne simuliert, die hin- und hergefahren werden kann. In einer Eichung wird die Antenne systematisch in einem Gitter verfahren, und an den Gitterpunkten werden jeweils die Lagesignale gemessen.

Ein solcher Eichtisch wurde im Rahmen einer Promotionsarbeit [Schillo91] aufgebaut und verwendet. An die Meßwerte des ausgemessenen Gitters wurden Eichpolynome achten Grades angepaßt, so daß man Funktionen  $Quot_x = f_x(x, z)$  und  $Quot_z = f_z(x, z)$  erhalten hat. Bei einer Strahlagemessung wird iterativ aus den gemessenen Quotienten die Strahlposition bestimmt.

Diese Eichung wurde für jede Monitor-Elektronik durchgeführt, um den Einfluß von elektronischen Toleranzen auf die Messung zu unterdrücken. Allerdings wurde immer die gleiche Referenz-Monitorkammer verwendet, so daß mechanische Toleranzen der einzelnen Monitorkammern als Fehler in die Messung eingehen.

Es wäre sehr aufwendig, die Monitore für Vermessungen wieder aus dem Beschleuniger auszubauen, aber es ist möglich, einfache Fehlermessungen bei schon installierten Monitoren durchzuführen: die Pickup-Methode [Jankowiak94].

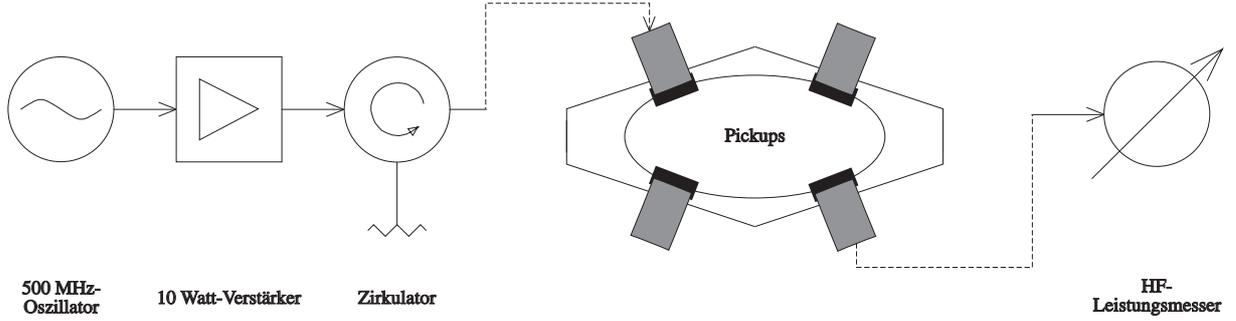


Abbildung 4.2: Meßprinzip der Pickup-Methode

## 4.2 Pickup-Methode

Ausgehend von einer ideal gefertigten Kammer, möchte man den Einfluß von mechanischen Toleranzen auf die gemessenen Signalgrößen kennen. Als Vereinfachung wird angenommen, daß sich diese Einflüsse lediglich in Dämpfungen der vier Signale zueinander ausdrücken. Wenn der entscheidende Fertigungsfehler die Positionierung der Knopfelektroden ist, ist diese Vereinfachung vertretbar.

Die vier Dämpfungsfaktoren  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  und  $a_4$  kann man, da für die Strahlungsmessung die absoluten Werte der gemessenen Spannungen irrelevant sind, so wählen, daß einer von ihnen immer 1 ist, so daß also drei Größen zu bestimmen sind. In der Pickup-Methode wird nun in einen der Knöpfe ein Hochfrequenzsignal eingespeist, und die an den drei anderen Knöpfen ankommende Signalleistung gemessen (Abbildung 4.2). Dies führt man mit jedem Knopf als Sender aus, so daß man insgesamt 12 Meßgrößen erhält. Im Folgenden seien  $U_{i \rightarrow j}$  die in einem idealen Monitor von der Elektrode  $i$  zur Elektrode  $j$  übertragene Spannung, und  $\tilde{U}_{i \rightarrow j}$  die am realen Monitor gemessenen Spannungen.

Aufgrund der allgemeinen Vertauschbarkeit von Sender und Empfänger ( $\tilde{U}_{i \rightarrow j} = \tilde{U}_{j \rightarrow i}$ ) hat man 6 unabhängige Meßgrößen. Wegen der Symmetrie der Monitorkammer weisen die Meßwerte eines idealen Monitors weitere Symmetrien auf:

$$\begin{aligned} U_{1 \rightarrow 2} &= U_{3 \rightarrow 4} & , \\ U_{1 \rightarrow 3} &= U_{2 \rightarrow 4} & , \\ U_{1 \rightarrow 4} &= U_{2 \rightarrow 3} & . \end{aligned} \quad (4.6)$$

Die gemessenen Spannungen werden durch die zu bestimmenden Dämpfungsfaktoren beeinflusst:

$$U_{i \rightarrow j} = a_i a_j \tilde{U}_{i \rightarrow j} \quad . \quad (4.7)$$

Einsetzen von Gleichung (4.7) in (4.6) und Auflösen nach den gesuchten Dämpfungsfaktoren, sowie Normieren ergibt:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 & , & \quad a_2 = \sqrt{\frac{\tilde{U}_{1 \rightarrow 4} \tilde{U}_{1 \rightarrow 3}}{\tilde{U}_{2 \rightarrow 4} \tilde{U}_{2 \rightarrow 3}}} & , \\ a_3 &= \sqrt{\frac{\tilde{U}_{1 \rightarrow 4} \tilde{U}_{1 \rightarrow 2}}{\tilde{U}_{3 \rightarrow 4} \tilde{U}_{2 \rightarrow 3}}} & , & \quad a_4 = \sqrt{\frac{\tilde{U}_{1 \rightarrow 2} \tilde{U}_{1 \rightarrow 3}}{\tilde{U}_{2 \rightarrow 4} \tilde{U}_{3 \rightarrow 4}}} & . \end{aligned} \quad (4.8)$$

Für eine einfache Abschätzung, welche Meßfehler eine Nichtbeachtung dieser Dämpfungen erzeugt, kann man für einen angenommenen mittigen Strahl die falsch gemessenen Quotienten  $Quot_x$  und  $Quot_z$  berechnen, und daraus die falsch bestimmte Strahlage ableiten.

Diese Pickup-Messungen wurden in ELSA an allen Monitoren durchgeführt (Anhang A.1). Es ergaben sich Fehler für die unkorrigierte Strahlungsmessung von bis zu 360  $\mu\text{m}$  horizontal und 980  $\mu\text{m}$  vertikal. Daraus kann man schließen, daß für präzise Strahlungsmessungen entweder eine Vermessung aller

Monitorkammern auf dem Eich Tisch nötig ist, oder eine Korrektur mit den vermessenen Dämpfungsfaktoren. Letzteres ist mit der bestehenden Monitorelektronik nicht möglich, da direkt zu Anfang Summen- und Differenzsignale gebildet werden, und so keine Rekonstruktion auf die eigentlichen vier Knopfsignale möglich ist.

Dies ist einer der Gründe, weshalb eine neue Monitorelektronik in Entwicklung ist. Diese wird die vier Knopfsignale einzeln ausmessen, so daß eine Korrektur auf unterschiedliche Dämpfungen ohne weiteres möglich ist. In den folgenden Abschnitten werden die alte und die neue Monitorelektronik beschrieben.

### 4.3 Die Elektronik der ELSA-Strahllagemonitore

Abbildung 4.3 zeigt das Prinzip der signalverarbeitenden Elektronik der ELSA-Strahllagemonitore. In unmittelbarer Nähe zu den Knopfelektroden befindet sich ein Front-End-Modul, das aus den vier Knopfsignalen die Summe und die Differenz (letztere wahlweise horizontal oder vertikal) bildet, und das diese Signale verstärkt. Außerdem kann über eine Ringleitung ein Kalibrationssignal eingespeist werden, was für den routinemäßigen Abgleich der nachfolgenden Elektronik nötig ist. Das Kalibrationssignal wird zentral von einem Synthesizer erzeugt und über eine Ringleitung an die Front-End-Module geleitet. Die Summen- und Differenzsignale werden aus dem Beschleunigertunnel geführt und an einem zentralen Ort (HF-Raum) weiterverarbeitet.

Das folgende HF-Modul besitzt schaltbare Verstärker von 12.8 und 28 dB (für eine Anpassung an die vom Strahlstrom abhängige Signalstärke) und einen synchronen Detektor. Dieser koppelt einen Teil des Summensignals aus und mischt dieses phasenverschoben mit dem ursprünglichen Summen- und Differenzsignal. Dadurch wird eine Gleichrichtung bewirkt.

Die gleichgerichteten Signale werden jeweils auf einen weiteren steuerbaren Verstärker mit Offset-Kompensation gegeben, und danach mit einem 8-Bit-Flash-ADC digitalisiert. Das System wurde so entworfen, daß nach einer Triggerung ein Speicher von 8192 Daten mit einstellbarer Taktrate (78 kHz bis 10 MHz) vollgeschrieben wird. Dieser Speicher kann dann von einem Feldbusprozessor ausgelesen werden, um die Daten einem VME-Rechner zu übermitteln, der aus den Summen- und Differenzsignalen die Strahl Lage rückrechnet.

Im Prinzip sind mit diesem System „Schnappschüsse“ des Orbits möglich, was beispielsweise das Ausmessen von Phasenvorschüben und Betatronamplituden-Verhältnissen zwischen den Monitoren erlaubt [Borer83]. Für eine Closed-Orbit-Messung wird ein solcher Schnappschuß bei der niedrigsten Samplerate aufgenommen, und es werden dann alle Werte gemittelt. Dies entspricht in etwa einer nachträglichen Tiefpaßfilterung.

Die Elektronik besitzt eine hohe Bandbreite von rund 10 MHz. Allerdings sind keine Tiefpaßfilter vorhanden, die die Bandbreite auf die Abtastrate abstimmen. Aufgrund des Nyquist-Theorems sollte die Abtastrate aber mindestens doppelt so hoch sein wie die Bandbreite. Durch diesen Mangel wird beim Digitalisieren immer die zeitliche Struktur des Strahls in dem durch die Bandbreite festgelegten Zeitbereich mitaufgezeichnet, unabhängig von der eingestellten Abtastrate. Daher spielt die Füllstruktur bei der Messung eine große Rolle. Bei einer inhomogenen Füllung von ELSA, also einer in der Amplitude stark schwankenden Monitor-Signal, muß die Verstärkung sehr klein eingestellt werden, wodurch das durch die endliche Auflösung der AD-Wandler entstehende Digitalisierungsrauschen vergrößert wird. Es ist dabei auch von Nachteil, daß die korrekte Verstärkereinstellung vom Benutzer vorgenommen werden muß. Das Ermitteln einer guten Einstellung kann unter Umständen viel Zeit in Anspruch nehmen.

Wegen technischer Probleme arbeitet die Datenübertragung zwischen Feldbusprozessoren und VME-Rechner nicht zuverlässig, so daß eine direkte Ansteuerung durch den VME-Rechner aufgebaut wurde. Dazu wurden im Hause spezielle Steuerkarten entwickelt, deren Programmierung im Rahmen dieser Diplomarbeit geschah.

### 4.4 Nachteile des ELSA-Monitorsystems

Leider ergaben sich zu dem Datenübertragungsproblem und dem Problem der optimalen Verstärkereinstellung noch weitere Probleme technischer und prinzipieller Natur, die das alte System für Closed-Orbit-Messungen nicht sehr geeignet erscheinen lassen:

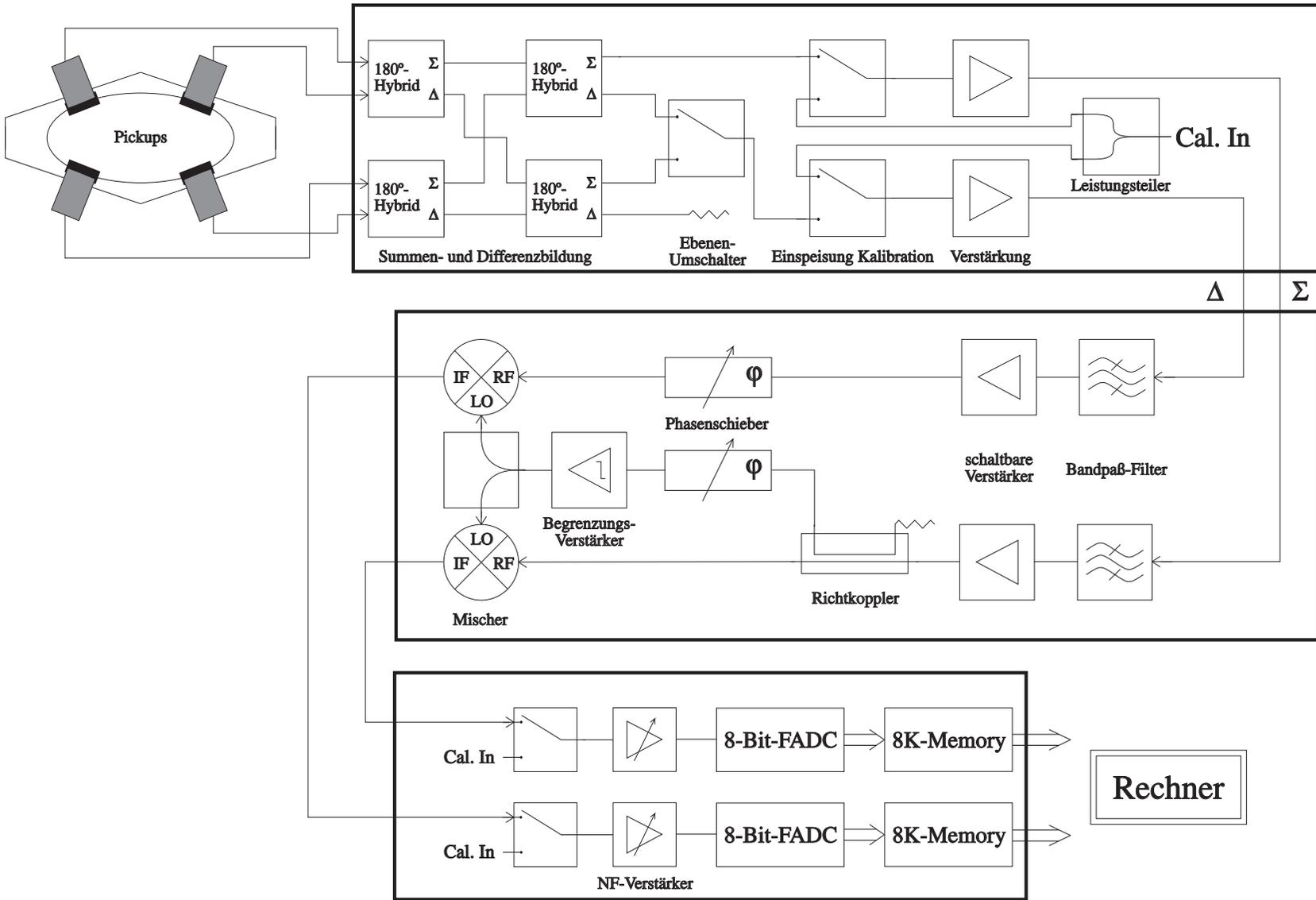


Abbildung 4.3: Die Elektronik der ELSA-Strahlagenmonitore

- Die Front-End-Elektronik erwies sich als sehr strahlungsanfällig. Insbesondere die GaAs-Schalter zum Selektieren des Differenzsignals und zum Einspeisen des Kalibrationssignals sind nicht besonders lange haltbar. Beispielsweise waren bei einem Test rund ein Drittel aller Schalter zum Einspeisen des Kalibrationssignals defekt. Nach einer Reparatur ist eine komplette Neukalibration auf dem Eichtisch notwendig, da die Komponenten für die routinemäßige Kalibration erst für die nachfolgende Elektronik wirksam sind.
- Ein großer Teil der Elektronik ist in HF-Technik aufgebaut. Dies ist kostenintensiv und erfordert präzisen Abgleich (z.B. Phasengleichheit der vier Knopfsignale am Eingang der Hybride zum Erzeugen von Summen- und Differenzsignal).
- Durch das Bilden von Summen- und Differenzsignalen gleich zu Beginn ist eine Korrektur auf unterschiedliche Dämpfungen der Elektroden nicht möglich. Die resultierenden Meßfehler sind sehr groß (siehe Abschnitt Pickup-Methode).
- Da das System zwei getrennte Signalzweige hat (Summen- und Differenzweig), ist eine präzise Kalibration beider Zweige nötig. So müssen die Kennlinien der NF-Verstärker regelmäßig vermessen werden, um unterschiedliche Driften auszugleichen.
- Die Phasenschieber für den synchronen Detektor sind nicht selbständig regelnd, d.h. sie müssen regelmäßig abgeglichen werden. Außerdem zeigt sich, daß der korrekte Abgleich vom Signalpegel, also von der Strahlintensität abhängt. Man muß also bei dem gleichen Strahlstrom messen, bei dem der Abgleich stattgefunden hat.
- Das System besitzt einige vom Operateur einzustellende Parameter (HF- und NF-Verstärker). Die korrekten Einstellungen sind von der Strahlintensität und der Füllstruktur abhängig, und von Monitor zu Monitor verschieden. Die optimalen Einstellungen zu finden ist sehr arbeitsaufwendig.
- Durch die aufwendige Ansteuerung und das Closed-Orbit-Meßprinzip mit Mittelung über viele tausend Einzelmeßwerte dauert eine komplette Orbitmessung (mit der bisherigen Feldbus-Ansteuerung) ca. 40 Sekunden. Damit sind gezielte Modellierungen des Orbits sehr zeitaufwendig. Lange Meßreihen müssen auf die strahlintensitätsabhängige Orbitdrift korrigiert werden. Ein schnelles Feedback-System ist nicht möglich.
- Es hat sich gezeigt, daß aus ungeklärtem Grund die Eichung sämtlicher Elektroniken hinfällig geworden ist. Bei den alten Eichtisch-Messungen trat ein systematischer Offset auf, der allem Anschein nach nun verschwunden ist. Dadurch ist insbesondere die Messung des vertikalen Orbits fehlerhaft.

Zur besseren Fehlerdiagnose wurde inzwischen ein tragbares Diagnosegerät entwickelt, das unter anderem Strahlensignale simulieren kann, mit denen das Front-End-Modul getestet wird. Außerdem wurde eine neue Ansteuerung für den alten, zwischenzeitlich inaktivierten Eichtisch aufgebaut, um eine komplette Neueichung der Elektroniken durchführen zu können.

Da damit aber nicht die prinzipiellen Nachteile des Systems beseitigt werden, wurde der Beschluß gefaßt, langfristig eine neue Monitorelektronik zu verwenden, die diese Nachteile nicht hat.

## 4.5 Eine neue Elektronik für die ELSA-Monitore

Es wurden verschiedene Konzepte für Monitorelektroniken untersucht und miteinander verglichen, namentlich die Elektroniken für die Strahlmonitore in DELTA, BESSY und ELETTRA, sowie die Elektronik der Firma Bergoz. Insbesondere wurde überprüft, ob eins der Konzepte für einen Einsatz an ELSA in Frage kommt.

Allen gemeinsam ist, daß nur ein Signalzweig zur Verstärkung und Gleichrichtung verwendet wird, wobei ein Multiplexer regelmäßig zwischen den vier Knopfsignalen umschaltet (sequentielle Datenerfassung). Damit gibt es nicht das Problem eines aufwendigen Abgleichs verschiedener Kanäle zueinander.

Entsprechend den unterschiedlichen Strahlströmen in den verschiedenen Beschleunigern gibt es in den einzelnen Elektroniken unterschiedliche Abschwächer- bzw. Verstärkerstufen. Ebenfalls unterscheiden sich die Entwürfe in unterschiedlichen Methoden der Gleichrichtung: Die BESSY-Elektronik [Anders95] besitzt einen Quadratur-Demodulator, DELTA [Brinker94] verwendet ein Mischen auf eine Zwischenfrequenz

mit anschließendem Diodengleichrichter, und Bergoz [Bergoz95] und ELETTRA [Ursic95] verwenden ein Mischen auf eine Zwischenfrequenz mit anschließendem synchronen Detektor.

Insbesondere die DELTA-Elektronik wurde näher untersucht; sie wurde auch an ELSA mit Strahl getestet. Daher wird hier kurz die genauere Funktionsweise beschrieben. Direkt hinter den vier Eingängen befinden sich Tiefpaßfilter, um den folgenden Multiplexer vor hohen Frequenzen zu schützen. Dann wird das selektierte Signal auf eine Zwischenfrequenz von 10.7 MHz heruntergemischt (dazu wird ein lokaler Quarzoszillator verwendet), verstärkt und gleichgerichtet. Das Signal wird danach mit einem Demultiplexer auf einen von vier 12-Bit-ADCs eines CAN-Bus-Moduls gelegt. Damit wird eine korrekte Zuordnung der Kanäle gewährleistet. Das gleichgerichtete Signal dient auch zur Regelung des Verstärkers, wobei die Schaltung kontinuierlich integrierend arbeitet, d.h. der Mittelwert aller vier Signale wird auf eine bestimmte Spannung geregelt. Die Zeitkonstante der Regelung liegt im Sekundenbereich.

Messungen am ELSA-Strahl ergaben eine durch Rauschen begrenzte Auflösung von ca. 5  $\mu\text{m}$ . Die automatische Verstärkungsregelung der Elektronik setzte ab einem Strahlstrom von rund 2 mA ein. Bei niedrigen Strahlströmen zeigte sich ein schwingendes Verhalten der Regelung. Außerdem ist die Schaltung aufgrund der langsamen Verstärkungsregelung nicht für schnell abnehmenden Strahlstrom oder für schnelle Orbitänderungen geeignet. Für DELTA ist das kein Manko, da die Maschine ein reiner Speicherring ist (wie auch BESSY und ELETTRA); in den Betriebsmodi von ELSA mit Extraktion und für Messungen auf Energierampen (nötig für die Beschleunigung polarisierter Elektronen) ist allerdings eine schnellere Verstärkungsregelung notwendig.

Da keine der betrachteten Elektroniken die speziellen Anforderungen bei ELSA vollständig erfüllt, wurde beschlossen, eine eigene Elektronik zu entwickeln. Da die dafür nötigen Kapazitäten im Hause nicht vorhanden waren, wurde so verfahren, daß lediglich die technischen Spezifikationen festgelegt wurden, die eigentliche Entwicklung aber von der COSY-Gruppe des Forschungszentrums Jülich durchgeführt wird [Mohos95].

Neben der Vermeidung der Nachteile des alten Monitorsystems wurden folgende Eckdaten festgelegt:

- Einsatzfähigkeit im Strahlstrombereich von 0.1 mA bis 200 mA. Dies entspricht Signalpegeln an den Knopfelektroden von 63  $\mu\text{V}$  bis 126 mV, und einem Dynamikbereich von 66 dB. Da an den ADCs Spannungen im Volt-Bereich anliegen müssen, muß die Schaltung eine maximale Gesamtverstärkung von 80 dB leisten können.
- Die durch die Elektronik begrenzte Ortsauflösung sollte bei der unteren Strahlstromgrenze noch 100  $\mu\text{m}$  betragen, das entspricht einer Spannungsänderung an den Knöpfen von rund 380 nV. Das äquivalente Eingangsrauschen der Schaltung sollte damit kleiner als 130 nV sein. Bei höheren Strahlströmen sollte so eine Auflösung im Mikrometerbereich zu erwarten sein.
- Für ein schnelles Feedback-System soll die Meßrate 1000 Orbitmessungen pro Sekunde betragen. Dies ist bei dem gegebenen äquivalenten Eingangsrauschen gerade noch möglich.
- Das System sollte selbstverständlich möglichst preiswert und einfach zu warten sein. Dazu zählt auch eine einfache Kalibrierung der Schaltung.

Aufgrund des letzten Punktes wurde das Konzept der sequentiellen Datenerfassung gewählt, wie es auch in der DELTA- und den anderen Elektroniken verwendet wird. Da eine Gesamtverstärkung von bis zu 80 dB nötig ist, technisch in einem Schritt aber nur bis zu 60 dB ohne großen Aufwand befriedigend möglich sind, muß die Gesamtverstärkung in zwei Schritten geschehen. Daher bietet sich ein Mischen auf eine Zwischenfrequenz an, mit Verstärkern vor und nach dem Mischer. Vor dem Mischer ist ein Bandpaß-Filter notwendig, um die Spiegelfrequenzen des Mixers herauszufiltern; ein schmalbandiges Filter hinter dem Mischer erlaubt ein Wegfiltern weiterer unerwünschter Signalkomponenten (Umlauffrequenz-Satelliten). Das Mischsignal wird extern über eine Ringleitung eingespeist, wie sie auch in der alten Elektronik zur Einspeisung des Kalibrationssignals verwendet wurde. Zusätzlich ist eine Möglichkeit zur Installation lokaler Oszillatoren vorgesehen.

Anstelle von Tiefpaßfiltern an den Eingängen werden Duplex-Filter verwendet. Das sind Kombinationen aus Hoch- und Tiefpaßfiltern, wobei die Hochpaßausgänge abgeschlossen werden. Dies soll einen guten Abschluß über den gesamten Frequenzbereich ergeben, um Kabelresonanzen zu vermeiden.

Die Verstärkungsregelung wird so ausgelegt, daß sie nach jedem Meßzyklus (Abtasten aller vier Elektrodenspannungen) die Verstärker nachregelt und damit eine Regelzeit im Millisekunden-Bereich besitzt.

Durch die hohe Abtastrate wird auch ein möglicher systematischer Fehler minimiert, es wird nämlich eine Scheinablage vorgetäuscht, wenn der Strahlstrom *innerhalb* eines Meßzyklus merklich abnimmt. Verkleinern kann man diesen Fehler auch dadurch, daß die Reihenfolge der Elektrodenabtastung regelmäßig vertauscht wird. Dadurch wird der Fehler in einem der Differenzsignale eliminiert; im Summensignal bleibt der Fehler jedoch bestehen.

Die eigentliche Gleichrichtung übernimmt ein synchroner Detektor mit Phase-Locked-Loop. Da ein solcher nur sehr aufwendig mit hoher Langzeitstabilität gebaut werden kann, ist eine automatische Offsetkorrektur vorgesehen. Dabei wird synchron bei einer Umschaltung der vier Eingänge für eine kurze Zeit ein Nullsignal auf den Detektor gegeben. Dies kann in der Einschwingzeit der Filter erfolgen.

Das gleichgerichtete Analogsignal wird über Tiefpaßfilter zum Unterdrücken von Aliasing auf einen 12-Bit-AD-Wandler gegeben, der von einem Mikrokontroller ausgelesen wird. Dieser Mikrokontroller verwaltet auch die Schalterstellungen und die Verstärkungsregelung und stellt die vier gemessenen Knopfsignale über einen seriellen Bus der zentralen VME-CPU zur Verfügung.

Ein vereinfachtes Schema des vorliegenden Konzepts der Elektronik zeigt Abbildung 4.4.

## 4.6 Nullpunktseichung von Strahllagemonitoren

Nicht vernachlässigen darf man das Problem einer Nullpunktseichung der Strahllagemonitore. Diese ist relativ zur magnetischen Mitte der Quadrupole gewünscht. Die mechanische Justierung der Monitor-Gehäuse geschieht in ELSA durch Anlegen von Schienen, bzw. mit einem Nivellier, relativ zu den benachbarten Quadrupolen. Diese Methoden haben eine Genauigkeit von bestenfalls 100 bis 200  $\mu\text{m}$ . Tatsächlich wurden einige Monitore, aufgrund ungünstiger Bedingungen vor Ort, noch nie richtig justiert. Außerdem ist nicht bekannt, wie die magnetischen Mitten der Quadrupole relativ zu den Bezugspunkten der Justiermessungen liegen.

Insofern erscheint eine relative Meßgenauigkeit der Monitore von vielleicht um die 5  $\mu\text{m}$  auf den ersten Blick übertrieben. Es gibt aber eine Möglichkeit, die *absolute* Strahlage in Quadrupolen mit Hilfe von präzisen Messungen von Strahllageänderungen zu bestimmen. Diese Methode wird im folgenden mit Quadrupol-Methode bezeichnet und kurz beschrieben [Roejsel94][Reichel95].

### 4.6.1 Quadrupol-Methode

Der Strahl erfährt in einem Quadrupol einen Kick, der proportional der Auslenkung  $x_Q$  des Strahls relativ zur magnetischen Mitte des Quadrupols ist. Außerdem ist der Kick proportional der integrierten Quadrupolstärke (Quadrupolstärke  $k$  multipliziert mit der effektiven Länge  $l_{eff}$ ):

$$\delta x' = k \cdot l_{eff} \cdot x_Q \quad . \quad (4.9)$$

Variiert man nun die Stärke des einen Quadrupols leicht, ändert sich auch der Kick und damit der Closed-Orbit geringfügig (vergleiche Kapitel 2):

$$\Delta x(s) = \frac{\sqrt{\beta(s)\beta_Q}}{2 \sin \pi Q} \cos(\pi Q - |\psi(s) - \psi_Q|) \cdot k \cdot l_{eff} \frac{\Delta I}{I} \cdot x_Q \quad . \quad (4.10)$$

Durch Messung der Orbitänderung  $\Delta x(s)$  kann man also die Strahlablage im Quadrupol bestimmen. Rechnungen haben gezeigt, daß bei einer  $k$ -Änderung von 5% und einer gewünschten Genauigkeit der Quadrupol-Methode von  $x_Q = 100 \mu\text{m}$  eine Monitorauflösung von  $\Delta x(s) \approx 5 \mu\text{m}$  nötig ist. Damit ist also eine hohe relative Genauigkeit der Strahllagemonitore indiziert.

Zur Nullpunktseichung von Strahllagemonitoren wird man also den Strahl in dem Quadrupol, der sich in unmittelbarer Nähe des zu eichenden Monitors befindet, so verschieben, daß eine  $k$ -Änderung den Closed-Orbit minimal beeinflusst. Der absolute Meßwert des zu eichenden Monitors ist dann der Nullpunkts-Offset.

Die  $k$ -Änderung des Quadrupols kann beispielsweise durch einen schaltbaren Parallelwiderstand (Shunt) erzeugt werden (Bild 4.5). Eleganter ist der parallele Anschluß eines Zusatznetzgeräts, das die Stromänderung erzeugt. Durch Anlegen eines Wechselstroms kann man die Strahlage im Quadrupol aus der Höhe

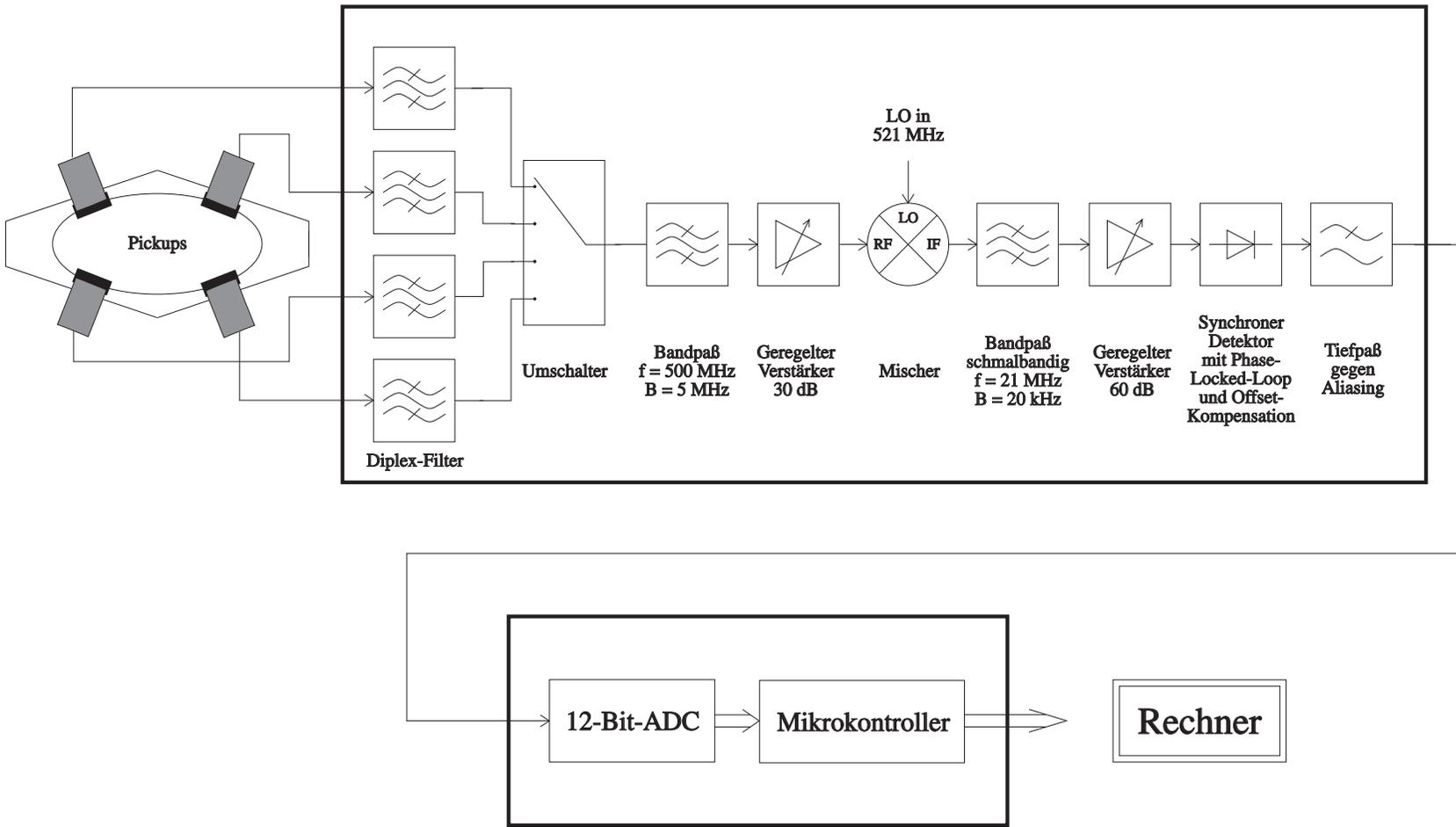


Abbildung 4.4: Die neue Elektronik der ELSA-Strahlagenmonitore

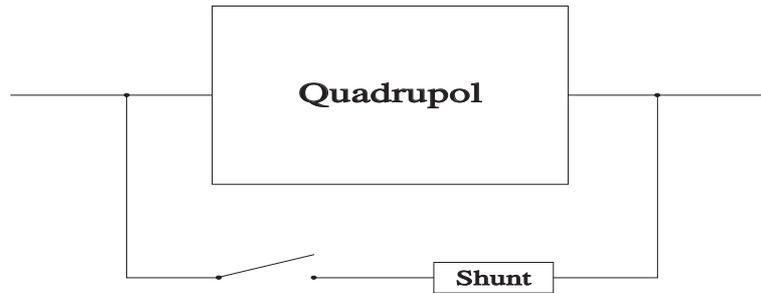


Abbildung 4.5: Quadrupol-Methode mit einem Shunt

der entsprechenden Frequenzlinie im Spektrum der gemessenen Strahllagen in den Monitoren bestimmen. Dies setzt natürlich eine entsprechende Zeitauflösung an den Monitoren voraus.

Leider ist zu beachten, daß die Änderung der Quadrupolstärke auch die Strahloptik beeinflusst, sich somit also  $\beta(s)$ ,  $\psi(s)$  und  $Q$  ändern und dadurch auch die Wirkungen sämtlicher anderer Kicks im Ring. Rechnungen zeigten, daß bei ELSA der Einfluß der Änderung der Strahloptik auf den Closed-Orbit durchaus vergleichbar dem direkten Einfluß der  $k$ -Änderung gemäß Gleichung (4.10) ist. Es wurden Messungen mit einem Testshunt an ELSA durchgeführt, um zu sehen, ob mit der Quadrupol-Methode brauchbare Ergebnisse erzielt werden können (siehe Kapitel 6.5).

#### 4.6.2 Pulsed-Wire-Methode

Es gibt noch eine weitere Methode für eine Nullpunktseichung von Strahllagemonitoren, die Pulsed-Wire-Methode. Dabei wird ein Draht durch die Vakuumkammer gespannt, und durch Messung der Bewegung des Drahtes nach einem Strompuls kann man das Magnetfeld entlang des Drahtes bestimmen [Geisler94]. Man sucht die magnetische Mitte des Quadrupols und kann dann mit weiteren Strompulsen den Offset des Monitors bestimmen, da ein Puls auch ein Signal im benachbarten Monitor erzeugt [Brinker95].

Diese Methode macht natürlich nur Sinn, wenn der Monitor fest mit dem Quadrupol verbunden ist, wenn sich also Monitor und Quadrupol nach der Messung nicht mehr relativ zueinander verschieben können. Außerdem ist eine solche Messung für gewöhnlich nur beim Aufbau des Beschleunigers sinnvoll, da der technische Aufwand sonst zu groß wird. Daher kommt die Methode für ELSA wohl nicht in Frage.

# Kapitel 5

## Software zur Orbit-Korrektur

Die Software zur Steuerung von Orbit-Messungen, die Berechnung und Ansteuerung von Orbit-Korrekturen, und eine Palette von Meßprogrammen wurden in dieser Diplomarbeit entwickelt bzw. erweitert. Ein großer Teil der Software-Arbeiten wurde notwendig, da 1994 ein neues Rechnerkontrollsystem für den Beschleuniger in Betrieb genommen wurde [Goetz95][Picard95], und die alte Software zum Teil portiert, zum Teil neu geschrieben werden mußte.

### 5.1 Das neue ELSA-Kontrollsystem

Das zentrale Element des neuen Kontrollsystems ist eine verteilte Online-Datenbank, die den Zustand des Beschleunigers in Form von Parametersätzen widerspiegelt, und ständig auf dem aktuellen Stand gehalten wird. Diese Datenbank ist auf mehreren Kontrollrechnern verteilt (Workstations, sie bilden die sogenannte Kontrollebene), so daß ein ausgeklügelter Datenübertragungs- und Benachrichtigungsmechanismus notwendig ist.

An den einzelnen Kontrollrechnern hängen jeweils Prozeßnetze mit mehreren VME-Rechnern (Betriebssystem VxWorks), die für die Verwaltung und Ansteuerung von intelligenter Hardware (z.B. über IEC-Bus) zuständig sind. Die Rechner besitzen für sich ebenfalls einen aktuellen Ausschnitt der Datenbank, über die die wesentliche Informationsübertragung mit den Kontrollrechnern (Senden von Befehlen, Übertragen von Meßwerten) stattfindet.

Applikationsprogramme können sich an das Kontrollsystem ankoppeln und haben so Zugriff auf die gesamte Datenbank. Damit können diese Programme Komponenten des Beschleunigers steuern oder Meßwerte auslesen. Eine spezielle Gruppe dieser Applikationsprogramme, die sogenannten Regelexperten, arbeitet ständig im Hintergrund, und hat die Aufgabe, aufgrund von Datenbankparameter-Änderungen physikalische und technische Berechnungen durchzuführen und die Resultate in anderen Parametern abzulegen. Beispielsweise berechnet ein Regelexperte aus der vom Operateur festgelegten Strahlenergie die Stromstärke der Dipolmagnete und skaliert die Stromstärken der übrigen Hauptmagnete. Andere Regelexperten steuern Komponenten des Beschleunigers auf einen entsprechenden Befehl des Operateurs, es gibt zum Beispiel einen Experten, der das Timingsystem für den Nachbeschleunigungsmodus setzt.

Eine weitere Applikation, die sich an das Kontrollsystem ankoppelt, ist das Menüsystem, das die Mensch-Maschine-Schnittstelle darstellt. In einer graphischen Benutzeroberfläche (X11, OSF/Motif) werden die Parameter der Datenbank dargestellt, und Sollgrößen können modifiziert werden. Ebenfalls zur benutzergeführten Kontrolle des Beschleunigers dient die EPOS-Applikation (ELSA Physics Operating System) [Goetz90][Picard91]. Dabei handelt es sich um eine kleine Programmiersprache mit Einrichtungen zum Auslesen und Beschreiben von Datenbankparametern, und vielen Werkzeugen zur Signalverarbeitung, Datenauswertung und graphischen Darstellung von Meßergebnissen. EPOS war auch schon im alten Kontrollsystem implementiert.

Weitere ständig laufende Applikationen sind beispielsweise ein Fehlermeldungs-Logger, eine Darstellung einiger wichtiger Beschleunigerdaten auf Statusbildschirmen, die im Institut verteilt sind, und die automatische Generierung von Statusseiten im World Wide Web. Weitere Applikationen koppeln sich nur vorübergehend an das Kontrollsystem an, um mit Meßdaten Berechnungen durchzuführen.

Abbildung 5.1 zeigt das beschriebene Konzept der Datenbank mit angekoppelten Applikationen und Prozeßsystem.

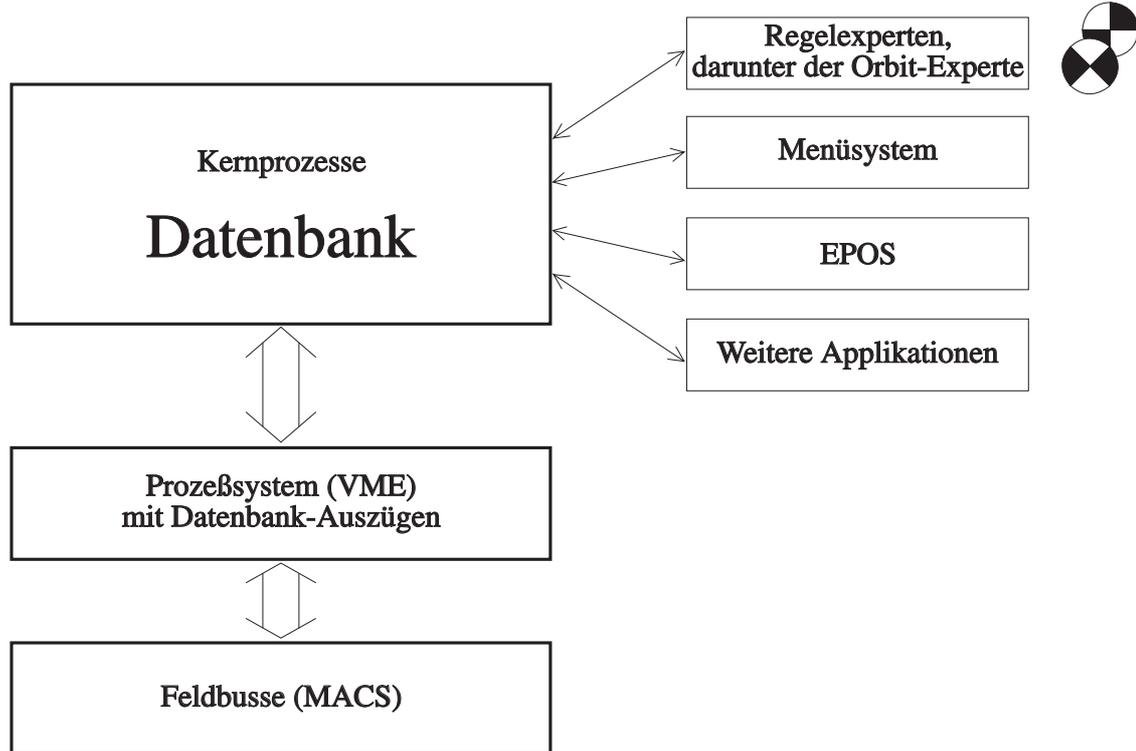


Abbildung 5.1: Schema des ELSA-Kontrollsystems

## 5.2 Software für die Strahllagemonitore

Für die Kontrolle der Strahllagemonitore steht ein VME-Rechner zur Verfügung, dem zum Zeitpunkt des Beginns der Diplomarbeit fünf Feldbusrechner unterstanden, die die eigentliche Hardware-Ansteuerung der Monitorelektronik übernahmen. Der VME-Rechner forderte zur Orbit-Messung von den Feldbusrechnern einzelne Meßwerte (Summen- und Differenzsignal) der Monitore an, berechnete daraus die Orbitablagen und schickte die Meßwerte an die Kontrollebene. Bei der Kalibration der Monitorelektroniken (Abgleich der Phasenschieber und Eichung der NF-Verstärker) führten die Feldbusprozessoren die eigentlichen Eichmessungen durch, die VME-Einheit berechnete aus den Resultaten lediglich noch einige Eichkonstanten zur Umrechnung von ADC-Werten in Spannungen.

In der Diplomarbeitszeit wurde die Software so erweitert, daß die Orbit-Messung und die Kalibration weitestgehend parallelisiert wurde (die Feldbusrechner arbeiten unabhängig voneinander), und es wurden einige zusätzliche Eigenschaften implementiert (z.B. automatisches Orbit-Messen in regelmäßigen Zeitabständen, ein Summenstatus, eine History der letzten zehn gemessenen Orbits und verbessertes Speichern und Laden von Kalibrationsdaten und -einstellungen).

Da die Datenübertragung zwischen den Feldbusrechnern und dem VME-Rechner unzuverlässig war, und die Feldbusrechner auch nur eine geringe Verarbeitungsgeschwindigkeit haben, wurde gegen Ende der Diplomarbeitszeit eine direkte Ansteuerung durch den VME-Rechner aufgebaut. Die VME-Software zur Ansteuerung der speziell für diesen Zweck entwickelten Steuerkarten wurde noch in dieser Zeit programmiert.

## 5.3 Software für die Korrektoren-Kontrolle

Die Korrektoren werden, wie früher die Monitore, von fünf Feldbusprozessoren mit Digital-Analog-Karten angesteuert, die wiederum von einem VME-Rechner bedient werden. Die notwendige VME-Software beschränkt sich auf das Umrechnen von gewünschten Stromstärken in Steuerwerte für Digital-Analog-Wandler, die die Steuerspannungen für die Korrektor-Netzgeräte erzeugen.

Die Software wurde von T. Götz vom alten Kontrollsystem portiert, und wurde im Rahmen der Diplomarbeit in einigen Punkten erweitert, nämlich eine Einrichtung zum Zurücksetzen der Korrektorstrome, eine Möglichkeit zum Speichern und Laden von Korrektoreinstellungen, eine Summenstatus-Bildung und eine Umrechnung von Kickwinkeln in Stromstärken. Die dafür notwendige Möglichkeit der Abfrage der Strahlenergie von der oberen Kontrollsystemebene mußte dazu ins Kontrollsystem eingebaut werden.

## 5.4 Software zur Berechnung von Orbit-Korrekturen

Im alten Kontrollsystem wurde die Berechnung der Korrektorstärken aus dem Monitormeßwerten in einem speziellen EPOS-Modul namens COCPIT (Closed Orbit Correction Program for Interactive Tasks) durchgeführt [Wenzel90]. Diese Software war kurz vor Beginn dieser Diplomarbeit in das neue Kontrollsystem portiert worden. Zu Beginn der Diplomarbeit wurden daher EPOS-Programme entwickelt, die die relativ komplizierten Schnittstellen zwischen neuem Kontrollsystem, EPOS und COCPIT richtig bedienen. Das System stellte allerdings nur eine Zwischenlösung dar; es wurde ein neues Konzept verwirklicht, das eine mausunterstützte Bedienung in einer graphischen Oberfläche zuläßt.

In diesem neuen System steht für Orbit-Korrektur-Berechnungen ein Regelexperte zur Verfügung. Dieser führt auf Befehl des Benutzers mit den Monitormeßwerten eine Berechnung der für die Korrektur nötigen Korrektorstärken durch, und simuliert eine entsprechend durchgeführte Korrektur. Die Simulationsergebnisse werden im Menüsystem dargestellt, so daß der Benutzer über die zu erwartende Qualität der Korrektur informiert ist und bei Bedarf andere Korrekturalgorithmen austesten kann. Danach kann durch Knopfdruck der Regelexperte veranlaßt werden, die Korrektoreinstellungen zu setzen. Über das gleiche Menü kann dann eine neue Orbit-Messung gestartet werden, um das Resultat der Korrektur zu sehen.

Wahlweise kann man einen Modus einstellen, in dem eine Orbit-Messung in regelmäßigen Abständen automatisch durchgeführt wird, und nach jeder Messung eine Korrektur berechnet und gesetzt wird. Damit ist ein einfaches Feedback-System realisiert, das aufgrund der Dauer einer Orbit-Messung (40 Sekunden) allerdings nur Langzeitdriften des Strahls korrigieren kann.

Als Korrekturalgorithmen wurden folgende in Kapitel 2 beschriebenen Algorithmen implementiert:

- eine Least-Square-Korrektur mit einstellbarer Eigenwert-Schwelle, wahlweise unter Berücksichtigung der theoretischen oder einer ausgemessenen Orbit-Response-Matrix,
- der MICADO-Algorithmus mit wählbarer Korrektoranzahl, ebenfalls wahlweise mit der theoretischen oder einer gemessenen Orbit-Response-Matrix,
- eine Korrektur von selektierbaren Orbit-Harmonischen,
- und ein Algorithmus zur Berechnung *beliebiger* geschlossener Orbit-Beulen. Dabei kann man beliebige Korrektoren wählen, und eine davon abhängige Anzahl an Orbit-Randbedingungen, also Strahlablagen und -winkel, festlegen.

Der Regelexperte berechnet außerdem nach jeder Orbit-Messung das Betrags-Maximum und den RMS-Wert der Meßwerte, das Orbit-Spektrum und einen Fit der Orbits an eine Dispersionsbahn. Mit letzterem kann eine mögliche Fehlanpassung der HF-Frequenz leicht korrigiert werden.

Sämtliche Funktionalitäten des Regelexperten, sowie die wichtigsten Funktionen des Monitor- und des Korrektorsystems können mit einem Menü bedient werden (Bild 5.2). Dieses erscheint auf den ersten Blick relativ groß und überladen. Versuche mit mehreren kleineren Menüs waren aber unbefriedigend, da man für eine Orbit-Korrektur mit Orbit-Messung, Korrekturberechnung, Simulation und Korrektorsetzen tatsächlich die meisten Funktionen des Menüs benötigt.

Für ein Einstellen der flexiblen Parameter der allgemeinen Orbit-Beule stellte sich die Menüapplikation des Kontrollsystems als nicht leistungsfähig genug heraus, so daß dafür eine eigene OSF/Motif-Applikation geschrieben wurde (Bild 5.3).

Die zur Berechnung von Orbit-Korrektur und Korrektursimulation notwendigen strahl-optischen Rechnungen werden mit einer Programmbibliothek durchgeführt, der sogenannten SimLib. Diese Bibliothek ist ein Nebenprodukt der Entwicklung eines Simulators für ELSA [Wenzel94]. Sie wurde im Zuge der Diplomarbeit unter anderem um Algorithmen zur Closed-Orbit-Korrekturberechnung erweitert.

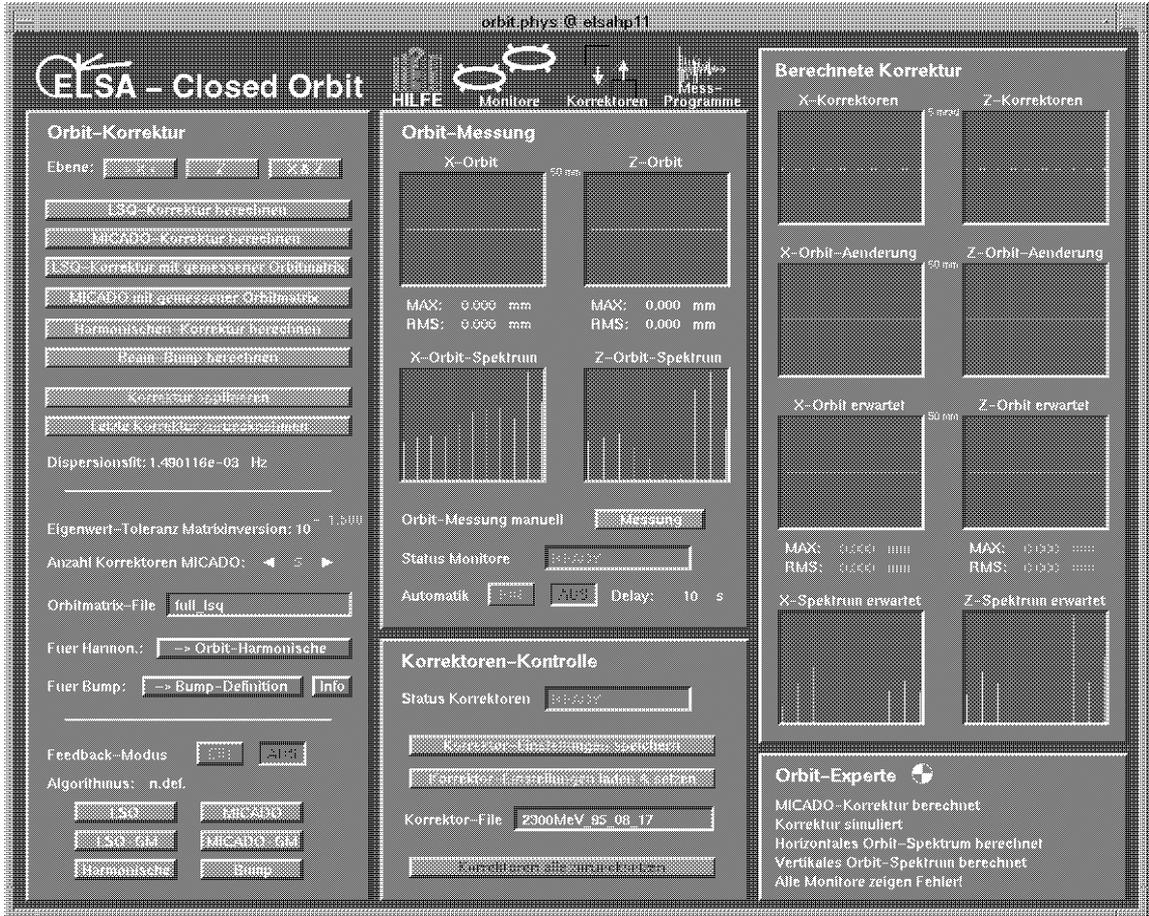


Abbildung 5.2: Menü zur Closed-Orbit-Kontrolle

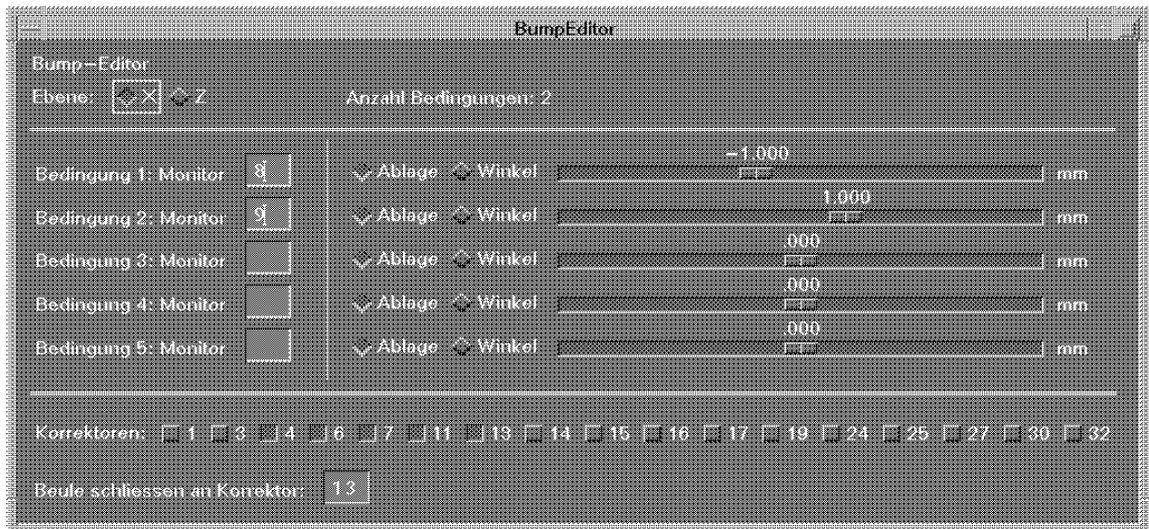


Abbildung 5.3: Editor zum Einstellen der Beulenparameter

Die SimLib ist so flexibel gehalten, daß sie auch in anderen Kreisbeschleunigern Verwendung finden kann. In der Tat werden die Programmroutinen auch am Beschleuniger COSY des Forschungszentrums Jülich benutzt.

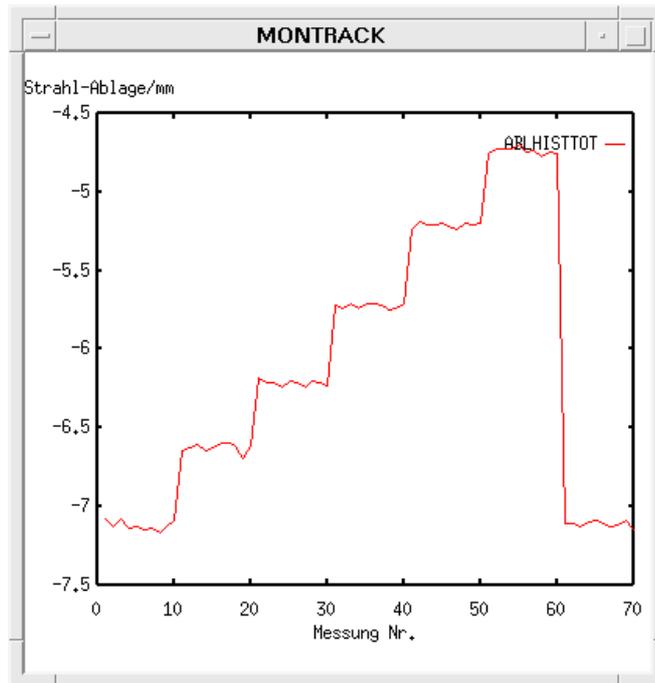
## 5.5 Meßprogramme

Zur möglichst automatischen Durchführung von größeren Meßreihen wurden einige Applikationen entwickelt. Die Mehrzahl der Applikationen sind EPOS-Programme, in einigen Fällen sind aber strahlontische Berechnungen nötig, die in EPOS nur mit Umwegen zu realisieren sind. In diesen Fällen wurden eigenständige Programme, die sich an das Kontrollsystem anbinden, und die SimLib verwenden, geschrieben. Die wichtigsten Programme können von einem Kontrollsystem-Menü aus aufgerufen werden:

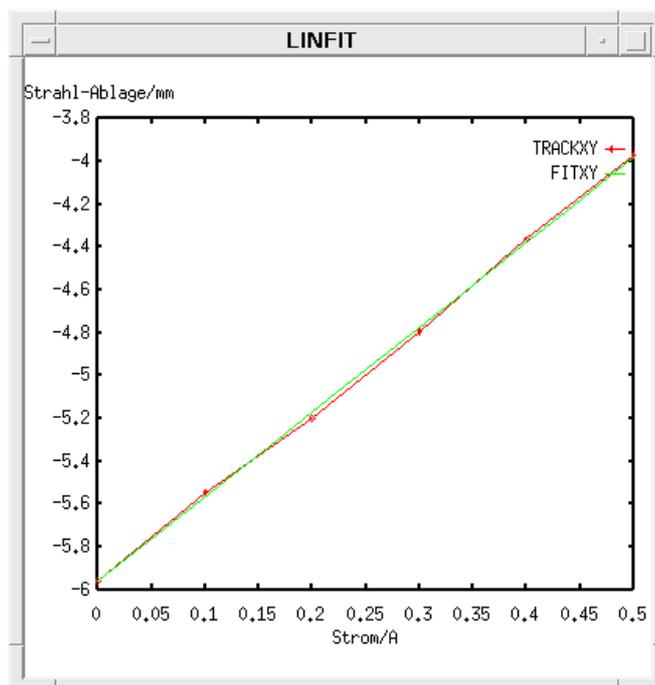
- Das Programm *Measurematrix* wird verwendet, um die Orbit-Response-Matrix auszumessen. Die Meßergebnisse werden in einer für den Orbit-Korrektur-Regelexperten lesbaren Form gespeichert. Darüberhinaus berechnet das Programm Eichfaktoren, die den Zusammenhang zwischen Kickwinkel und Korrektorstromstärke gemäß Gleichung 2.13 beschreiben.
- Mit der Applikation *Realign* können transversale Stellfehler der Quadrupole berechnet werden, wahlweise mit dem Least-Square- oder mit dem MICADO-Algorithmus. Ein Verschieben der Quadrupole gemäß dieser Stellfehler sollte den Orbit wie ein Verwenden von Korrekturdipolen korrigieren. Man sollte allerdings beachten, daß diese berechneten Stellfehler nicht den realen entsprechen müssen, da einer Orbit-Messung diesbezüglich zu wenig Information zu entnehmen ist.
- Für eine Dauermessung des Orbits stehen zwei EPOS-Programme zur Verfügung (eins zur Messung, das andere zur Auswertung). Damit kann das Rauschen der Meßwerte, die Abhängigkeit des Orbits von der Strahlintensität, und die Langzeitdrift bestimmt werden.
- Weitere EPOS-Programme verschieben den Orbit gezielt und ermitteln die Wirkung auf die Monitormeßwerte. Der Orbit kann durch Änderung der HF-Frequenz auf eine Dispersionsbahn, durch Fahren eines Korrektors und durch Schalten eines Quadrupol-Shunts auf eine Kickbahn geschoben werden. Je nachdem kann man mit den Messungen die Linearität der Monitore in  $x$ - und  $z$ -Richtung und die Linearität der Korrektormagnete überprüfen, die Dispersions- und Kickbahnen ausmessen und die Strahlablage im betreffenden Quadrupol ermitteln.

Bild 5.4 zeigt als Beispiel die Grafikausgabe, die das Meßprogramme für Kickbahnen mit dem vertikalen Korrektor in Halbzelle 3 am Monitor 5 erzeugt hat.

Im folgenden Kapitel werden die für diese Diplomarbeit durchgeführten Orbit-Messungen beschrieben. Für die Messungen wurden auch die aufgelisteten Meßprogramme verwendet. Wiederholungen der Messungen sind damit leicht möglich.



(a) Einzelmeßwerte



(b) Linearer Fit an die Messungen

Abbildung 5.4: Grafikausgabe eines Meßprogramms

# Kapitel 6

## Ergebnisse der Closed-Orbit-Messungen

In einer Reihe von ELSA-Tests wurden im Speicherbetrieb bei verschiedenen Energien Messungen zum Closed-Orbit durchgeführt. Es wurden dabei zum Teil die im letzten Kapitel beschriebenen Meßprogramme verwendet. Die Tests dienten einem umfangreichen Funktionstest der Monitore und Korrektoren, dem Testen der Quadrupol-Methode zur Orbit-Messung, der Messung von Eigenschaften des Closed-Orbits, und dem Austesten der Korrektur-Software.

### 6.1 Dispersionsbahnen, horizontale Monitor-Linearität

Um die Funktionsfähigkeit der Monitore zu testen, wurden Messungen der Dispersionsbahn bei einer Strahlenergie von 1.2 GeV gemacht. Der Orbit läßt sich durch Frequenzänderungen der HF auf Dispersionsbahnen schieben:

$$\Delta x(s) = D(s) \frac{\Delta p}{p} = D(s) \cdot \left( \frac{1}{\gamma^2} - \alpha \right)^{-1} \cdot \frac{\Delta f}{f} \approx \frac{-D(s)}{\alpha} \frac{\Delta f}{f} \quad (6.1)$$

mit  $D(s)$ : Dispersionsfunktion

$\Delta f/f$ : Relative Frequenzänderung

$\alpha$ : Momentum-Compaction-Faktor

$\gamma$ : Relativistisches Gamma ( $E/E_0$ ).

Orbitänderungen sind also linear von Frequenzänderungen abhängig. Damit kann die Linearität der Monitore in  $x$ -Richtung getestet werden. Außerdem ist es so möglich, die Dispersion an den Monitorpositionen auszumessen.

Dazu wurde für jeden Monitor die HF-Frequenz in jeweils sechs 3 kHz-Schritten verfahren; auf jeder Stufe wurden wiederum 10 Messungen vorgenommen, um das Rauschen zu bestimmen und wegzumitteln. Eine solche Meßreihe dauerte um die 15 Minuten. In dieser Zeit änderte sich die Strahlintensität deutlich, und die Orbitablagen sind, wie sich gezeigt hat, intensitätsabhängig, so daß eine dementsprechende Korrektur nötig war. Dazu wurde nach der Meßreihe auf die ursprüngliche HF-Frequenz zurückgefahren, um eine zusätzliche Null-Messung durchzuführen, und so den linearen Anteil der intensitätsabhängigen Drift zu bestimmen. An die korrigierten Meßwerte wurde schließlich eine Gerade angepaßt, um die Dispersion zu bestimmen.

Während einer Speicherzeit konnten so zwei bis drei Monitore vermessen werden. Die genauen Meßwerte kann man im Anhang A.2 nachlesen. Die folgenden Resultate sind herauszuheben:

- Das Rauschen beträgt bei den benutzten Monitor-Einstellungen je nach Strahlintensität (60 bis 20 mA) normalerweise ca. 30 bis 90  $\mu\text{m}$  RMS. Die Einstellungen wurden nicht individuell optimiert, da der dafür nötige Zeitaufwand sehr groß ist; vielmehr wurde für alle Monitore eine möglichst gemeinsame Einstellung gewählt, bei der nahezu alle Monitore ohne Fehlermeldung arbeiteten.

- Die Orbitdrift während einer ca. 15-minütigen Meßreihe betrug bis zu 1.1 Millimeter. Die Strahllage (bzw. der Meßwert) ist also stark intensitätsabhängig (dies zeigte sich auch bei Orbit-Dauermessungen während Synchrotronlicht-Strahlzeiten, vgl. Abschnitt 6.6.2).
- Der Linearitätsfehler der geeichten Monitore ist überwiegend gering. Die Meßpunkte lassen sich sehr gut linear approximieren. Abweichungen von der Geradenform liegen normalerweise bei etwa einem Prozent. Sie lassen sich auf Rauschen und auf einen *nicht*linearen Orbithub während der Messung zurückführen.
- Die ermittelten Dispersionswerte stimmen zum großen Teil sehr gut mit der Theorie überein (siehe Abbildung 6.1).

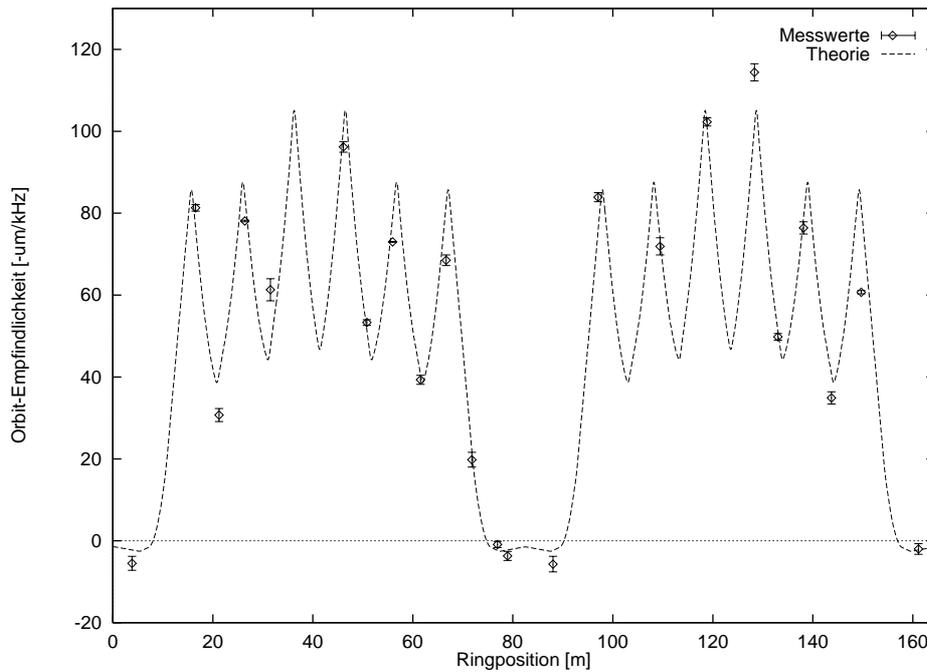


Abbildung 6.1: Vergleich gemessener mit (durch die Dispersion verursachte) theoretischer Orbitabhängigkeit von der HF-Frequenz

## 6.2 Linearität der Korrektoren

Nach Überprüfung der Linearität der Monitore in der horizontalen Strahlebene wurde die Linearität eines Korrektormagneten ausgemessen. Dazu wurde der Monitor 24 verwendet, da dieser in den Dispersionsmessungen ein sehr geringes Rauschen gezeigt hatte. Als Korrektor wurde KH32 genommen, weil dieser Korrektor einen günstigen Phasenvorschub zu Monitor 24 besitzt.

Es wurde eine Fahrkurve, die den maximalen Strombereich der Korrektoren abdeckt, durchgemessen und wieder auf die Lagedrift während der Messung korrigiert. Das Meßergebnis ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Folgende Resultate sind festzuhalten:

- Die Korrektormagnete gehen ab ca. 1 A langsam in Sättigung, d.h. sie sind oberhalb dieses Stroms nicht mehr linear.
- Die Korrektoren zeigen eine leichte Remanenz, also ist die Feldstärke von den Vorbedingungen abhängig. Ohne Beachtung von Fahrkurven für die Korrektoren ergeben sich dadurch Orbitablagenfehler von bis zu rund  $150 \mu\text{m}$ .
- Der maximal erzeugbare Kickwinkel eines Korrektors beträgt ca. 0.8 mrad bei 1.2 GeV (also ca. 0.3 mrad bei 3.5 GeV). Dies ist für die Korrigierbarkeit der gemessenen Orbitablagen bei hohen Energien leider nicht ganz ausreichend (vergleiche Tabelle 3.4 und Messungen in 6.8).

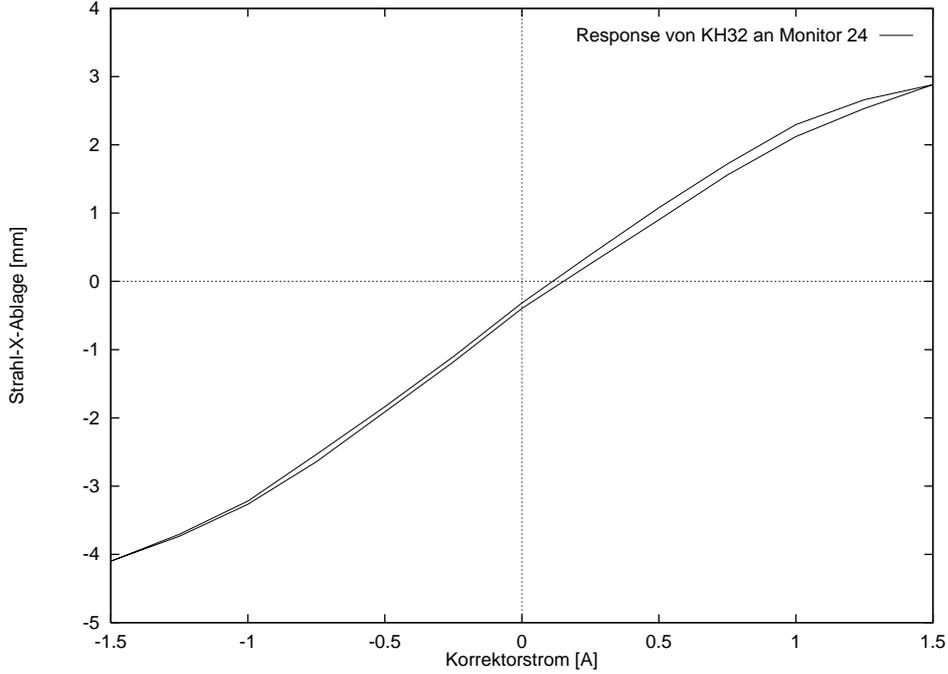


Abbildung 6.2: Linearität eines Korrektors

### 6.3 Kickbahnen, vertikale Monitor-Linearität

Anschließend wurden Messungen zur Linearität der Monitore in  $z$ -Richtung durchgeführt. Da in  $z$ -Richtung für solche Messungen eine zu geringe Dispersion vorhanden ist, mußten hier die Orbitauslenkungen durch Korrektoren erzeugt werden. Die Linearität der Korrektoren wurde schon ausgemessen; die folgenden Messungen wurden in 100 mA-Schritten von 0 bis 500 mA durchgeführt.

Um die Messungen vergleichbar zu machen, sollten möglichst wenig verschiedene Korrektoren verwendet werden; da manche Monitore zu einem bestimmten Korrektor ungünstige Phasenvorschübe besitzen, wurden zwei verschiedene Korrektoren benutzt (KV1 und KV3), und für die einzelnen Monitore jeweils der günstigere ausgewählt.

Unter Berücksichtigung der Strahloptik kann man den Eichfaktor  $k$  für die Korrektoren bestimmen (vgl. Gleichung (2.13)):

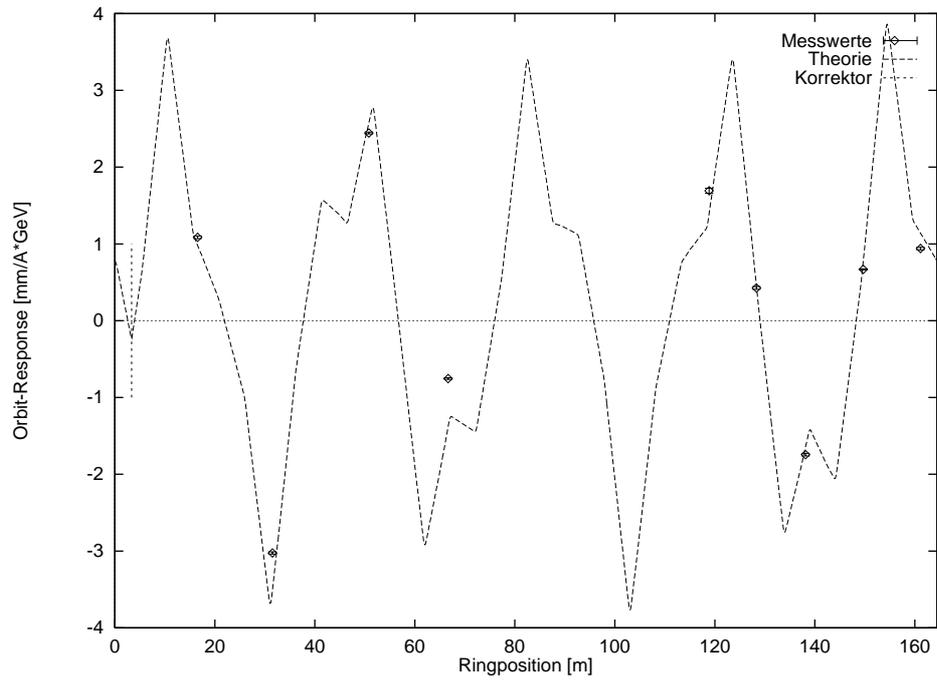
$$\Delta z(s) = \frac{\sqrt{\beta(s)\beta_K}}{2 \sin \pi Q} \cos(\pi Q - |\psi(s) - \psi_K|) \frac{I}{Ek} \quad , \quad (6.2)$$

$$\Leftrightarrow k = \frac{\sqrt{\beta(s)\beta_K}}{2 \sin \pi Q} \cos(\pi Q - |\psi(s) - \psi_K|) \frac{I}{E\Delta z} \quad . \quad (6.3)$$

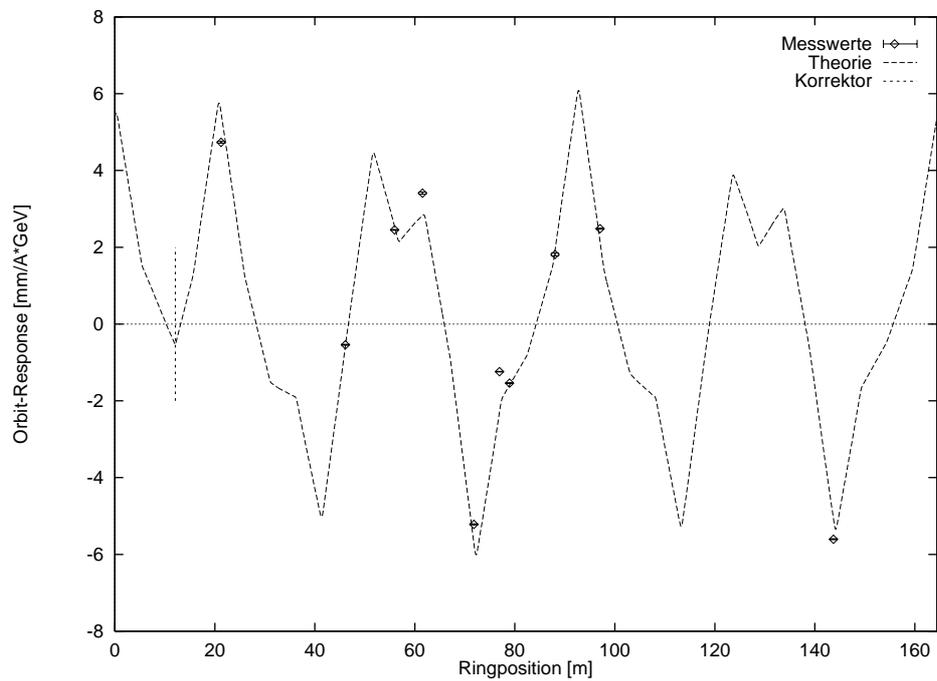
Da nur zwei Korrektoren verwendet wurden, sollten diese berechneten Faktoren jeweils übereinstimmen. Als Ergebnis ergab sich folgendes:

- Das Rauschen der Monitore ist in  $z$ -Richtung um einen Faktor 3 geringer als in  $x$ -Richtung (ca. 10 bis 30  $\mu\text{m}$ ). Das ist insofern überraschend, da durch die Geometrie der Kammer die Monitore in  $z$ -Richtung unempfindlicher sind, und dadurch auch das Rauschen der Elektronik einen stärkeren Einfluß haben sollte. Eine Erklärung für dieses Phänomen steht noch aus.
- Die Linearitätsfehler der geeichten Monitore in  $z$ -Richtung betragen wie in  $x$ -Richtung meistens rund ein Prozent und sind damit gering.
- Die berechneten Eichfaktoren stimmen überwiegend überein (um die 1.3 A/mrad/GeV). Leichte Schwankungen lassen sich durch Abweichungen der theoretischen von der realen Strahloptik erklären. Allerdings zeigten einige Monitore signifikante Abweichungen von den Mittelwerten, was auf Defekte der Elektronik hinweist.

- Abbildung 6.3 zeigt die Meßwerte im Vergleich zu den theoretischen Kickbahnen, die detaillierten Meßwerte finden sich im Anhang A.3.



(a) Korrektor KV1



(b) Korrektor KV3

Abbildung 6.3: Vergleich gemessener mit theoretischer  $z$ -Response

## 6.4 Orbit-Response-Matrix und Winkel-Strom-Eichung der Korrektoren

Nach diesen gründlichen Tests der Linearitäten von Monitoren und Korrektoren wurde eine Winkel-Strom-Eichung der Korrektoren durchgeführt. Dabei wurde jeder Korrektor jeweils bei 0 mA, 0.3 mA und wieder 0 mA Korrektorstrom angesteuert (um Lagedriften während der Meßzeit auszugleichen) und jeweils der komplette Orbit vermessen. Die Korrektorantwort wurde so an jedem Monitor bestimmt und daraus mit einem Least-Square-Fit die Eichkonstante ermittelt. Die Meßwerte wurden außerdem als Orbit-Response-Matrix abgespeichert, die für Orbit-Korrekturen verwendet werden kann.

Es ergaben sich Konstanten von 1.1 bis 1.3 A/mrad/GeV für die normalen Korrektoren, und 1.7 bis 1.9 A/mrad/GeV für die kleinen Korrektoren. Diese Konstanten wurden im Kontrollsystem für nachfolgende Orbit-Korrekturen gespeichert.

## 6.5 Test-Messungen zur Quadrupol-Methode

Im folgenden wurde eine andere Einstellung der Monitor-Elektronik gewählt (beide HF-Verstärker statt nur einem eingeschaltet). Dadurch wurde die Streuung der Meßwerte deutlich verkleinert, allerdings waren nur Messungen bei guter Füllung und nicht zu großen Strahlströmen möglich.

Es wurden Messungen mit einem Shunt in Quadrupol D27 gemacht. Dabei wurde der Orbit mit und ohne Shunt gemessen, um aus den Orbitänderungen die Strahlablage im Quadrupol zu bestimmen. Es sollte geklärt werden, ob die Monitore konsistente Werte liefern, und ob die mit der Quadrupol-Methode bestimmte Strahlablage im Quadrupol mit dem Strahlage-Meßwert des Monitors in unmittelbarer Nähe des Quadrupols übereinstimmt. Die Messungen sollten außerdem zeigen, ob der Effekt vernachlässigbar ist, daß das Ändern des Quadrupol-Stroms auch die Strahloptik verändert.

Der verwendete Shunt senkt den Quadrupol-Strom um ca. 5% (bei kalter Maschine ausgemessen). Das ist eine für statische Shunt-Messungen gute Einstellung: die Änderung der  $z$ -Strahlage beträgt bis zur einigen Millimetern, was die Lebensdauer schon merklich sinken läßt (um die 20%), während die Änderungen der  $x$ -Strahlage im Zehn-Mikrometer-Bereich liegen und daher mit dem Monitorsystem gerade noch meßbar sind. Die Änderungen in der horizontalen Strahlebene sind kleiner, da der Shunt an einem horizontal defokussierenden Quadrupol montiert ist, an dem die horizontale Beta-Funktion naturgemäß ein Minimum hat.

Die während der Messung eingestellten Arbeitspunkte waren:  $Q_x=4.585$ ,  $Q_z=4.563$ . Die für die weitere Auswertung verwendeten Meßergebnisse sind in Anhang A.4 zusammengestellt. Eine Mittelung über diese Meßergebnisse ergibt folgende Werte, im Vergleich zu dem Meßwert des Monitors, der in unmittelbarer Nähe des betreffenden Quadrupols installiert ist:

Meßmethode	$x$ [mm]	$z$ [mm]
Quadrupol-Methode	$-0.65 \pm 0.18$	$-5.65 \pm 0.80$
Strahlage-Monitor	0.29	-4.82

In einer späteren Testschicht wurde der horizontale Orbit korrigiert und die Shunt-Messung wiederholt. Diesmal ergibt sich:

Meßmethode	$x$ [mm]	$z$ [mm]
Quadrupol-Methode	$-0.50 \pm 0.23$	$-5.91 \pm 0.81$
Strahlage-Monitor	0.01	-4.82

Der Monitor hat also eine horizontale Strahlage-Änderung von  $280 \mu\text{m}$  gemessen, die Messungen mit der Quadrupol-Methode lieferten eine Änderung von  $(150 \pm 290) \mu\text{m}$ . Man kann von einer Übereinstimmung sprechen; die Fehler der Quadrupol-Methode sind aber recht groß. Die Messung zeigt außerdem, daß der Monitor einen Offset von ca.  $-0.5$  mm besitzt.

Man kann resümieren, daß ein Quadrupol-Shunt die Strahloptik so stark beeinflusst, daß ein dadurch resultierender Einfluß auf den Orbit nicht vernachlässigbar ist. Effektiv bedeutet dies eine starke Vergrößerung

des Meßfehlers. Die Größe des Meßfehlers hängt davon ab, wie groß die Orbitablagen im gesamten Beschleuniger sind, und sollte daher bei einem gut korrigiertem Closed-Orbit kleiner sein. Damit dürfte eine iterative Verbesserung der Meßwerte und damit wiederum der Orbit-Korrekturen möglich sein.

Statt der Verwendung eines Shunts ist es besser, die Stromänderung im Quadrupol durch ein Zusatznetzgerät zu bewirken, da zum einen die Stromänderung so viel präziser einzustellen ist, zum anderen mit einem angelegten Wechselstrom und Frequenzanalyse mit sehr viel kleineren Stromänderungen gearbeitet werden kann [Reichel95].

Für eine flexible Möglichkeit der Beschaltung sollen in naher Zukunft Leitungen von allen Quadrupolen zu einem zentralen Punkt verlegt werden, wo dann wahlweise Shunts oder geeignete Netzgeräte angeschlossen werden können.

## 6.6 Einflüsse von Arbeitspunkt, Strahlstrom und Strahlenergie auf den Closed-Orbit

Es wurde untersucht, welche Einflüsse die Parameter Arbeitspunkt, Strahlstrom und Strahlenergie auf den Closed-Orbit haben. Der Arbeitspunkt beeinflusst die *Wirkung* der den gestörten Closed-Orbit erzeugenden Dipolkicks gemäß Gleichung (2.9), so daß bei einer Arbeitspunkt-Änderung auch der Closed-Orbit verschoben wird.

Eine Variation der Strahlenergie hingegen bewirkt eine Änderung eines Teils der Dipolkicks selbst; es skalieren nämlich nicht alle Störfelder linear mit der Energie, beispielsweise Feldfehler durch Sättigungseffekte der Magnete. Der Einfluß des Strahlstroms schließlich ist indirekter Natur: durch Wechselwirkung der Strahlteilchen mit sich selbst und mit der Vakuumkammer entstehen Arbeitspunkt-Verschiebungen proportional zum Strahlstrom, und die Arbeitspunkt-Verschiebung wiederum beeinflusst den Closed-Orbit.

In den im Folgenden beschriebenen Messungen sollte geklärt werden, wie stark die Einflüsse der erwähnten Parameter sind. Die Closed-Orbit-Verschiebungen durch Änderung der Strahlenergie sind insbesondere für die Beschleunigung polarisierter Elektronen interessant. Ob sich mit den Meßergebnissen weitere Aussagen, beispielsweise über die dominierenden Ursachen von Closed-Orbit-Störungen, ableiten lassen, wurde nicht untersucht.

### 6.6.1 Arbeitspunkt-Abhängigkeit

Der  $x$ -Orbit wurde bei drei verschiedenen  $x$ -Arbeitspunkten vermessen:  $Q_x = 4.539$ ,  $Q_x = 4.583$  und  $Q_x = 4.623$  ( $Q_z = 4.563$ ); ebenso wurde der  $z$ -Orbit bei folgenden  $z$ -Arbeitspunkten ausgemessen:  $Q_z = 4.523$ ,  $Q_z = 4.563$  und  $Q_z = 4.603$  ( $Q_x = 4.583$ ). Damit wurde das bei ELSA übliche Arbeitspunktspektrum überdeckt. In Abbildung 6.4 wurden die Orbit-Änderungen relativ zum Closed-Orbit beim jeweils kleinsten Arbeitspunkt aufgetragen. Man erkennt, daß der Orbit bis zu ca. einem Millimeter mit dem Arbeitspunkt variiert.

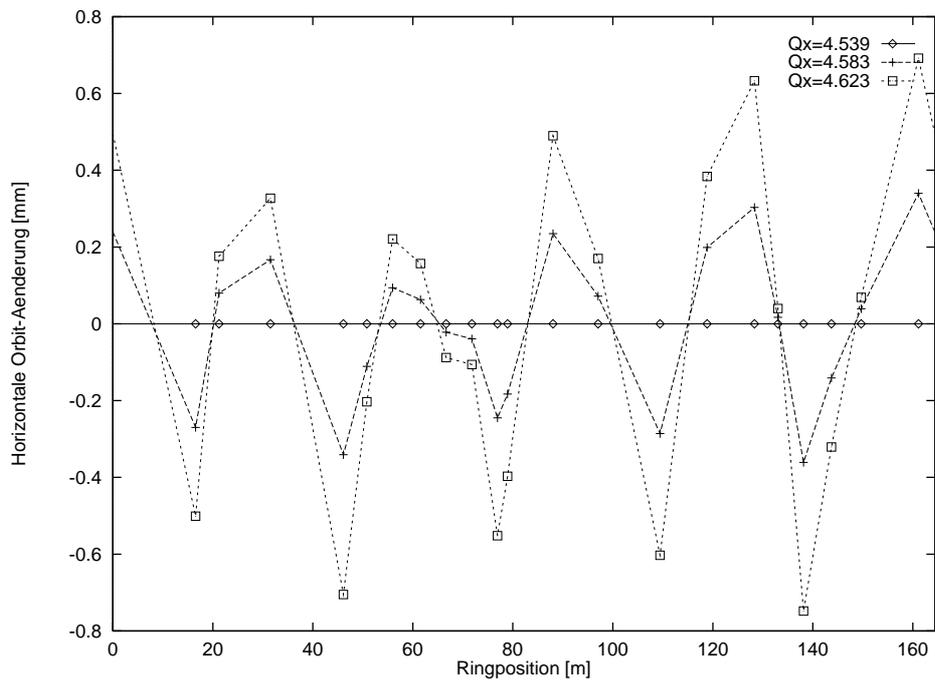
### 6.6.2 Strahlstrom-Abhängigkeit

Während Strahlzeiten im Speichermodus für Synchrotronlicht-Experimente wurden im Hintergrund Orbit-Dauermessungen durchgeführt.

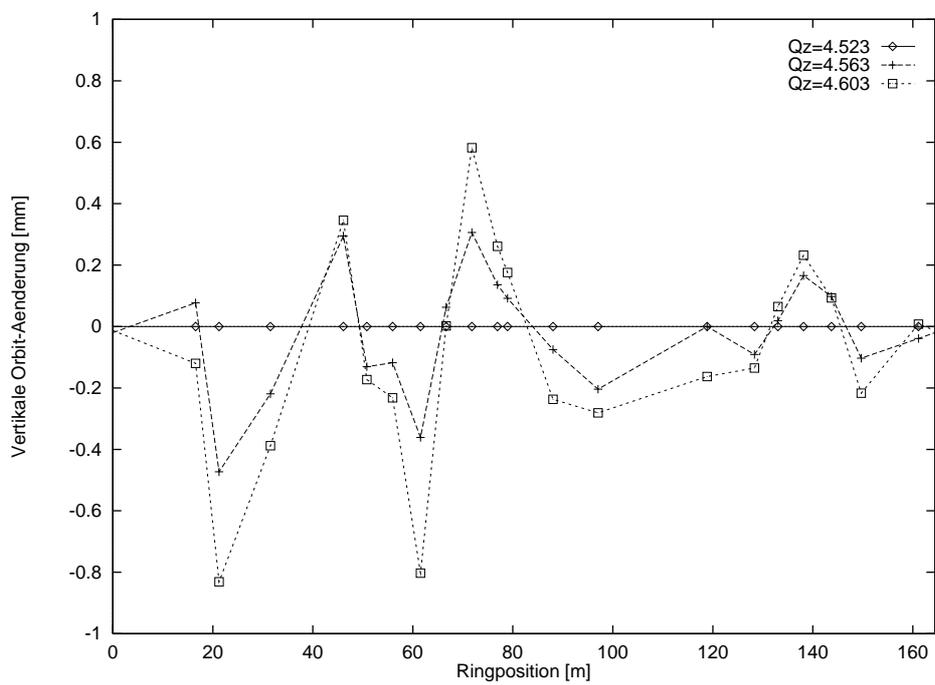
Es besteht eine starke Korrelation zwischen Strahlstrom und Orbitablage. Der gemessene Orbithub während einer Speicherzeit beträgt einige Hundert Mikrometer und mehr (Bilder 6.5 und 6.6 zeigen Ergebnisse aus einer 7.5 Stunden dauernden Messung).

Allerdings dürften diese Meßwerte durch Effekte der Elektronik dominiert werden, da der Abgleich der Monitorelektronik intensitätsabhängig ist. Dies wird unterstützt durch die Tatsache, daß die *Form* der Orbit-Änderungen in Bild 6.6 nicht übereinstimmt mit der in Bild 6.4, also nicht von Arbeitspunkt-Änderungen dominiert wird. Auch messen einige Monitore starke Orbit-Änderungen (bis zu 1.5 Millimeter), die unwahrscheinlich sind.

Außerdem haben Testmessungen mit der Elektronik der DELTA-Monitore eine intensitätsabhängige Orbit-Drift von rund  $100 \mu\text{m}$  ergeben; dies wurde aber nur an einem Punkt im Beschleuniger ausgemessen und ist damit nicht repräsentativ.



(a) Gemessene  $x$ -Orbit-Änderungen



(b) Gemessene  $z$ -Orbit-Änderungen

Abbildung 6.4: Einfluß der Arbeitspunkte auf den Closed-Orbit

Ein anderes Resultat der Orbit-Dauermessungen ist, daß das Driften der Elektronik eher gering ist. Das ist daran zu erkennen, daß die Meßwerte von aufeinanderfolgenden Speicherzeiten in Abbildung 6.5 gut übereinanderliegen.

### 6.6.3 Strahlenergie-Abhängigkeit

Es wurde die Energieabhängigkeit des Closed-Orbits gemessen, indem jeweils eine Orbit-Messung bei folgenden Strahlenergien durchgeführt wurde:  $E=1.2$  GeV,  $E=1.9$  GeV,  $E=2.3$  GeV und  $E=2.7$  GeV (Abbildung 6.7). Der Arbeitspunkt und der Strahlstrom waren für alle Messungen gleich.

Es zeigt sich, daß die  $x$ -Orbitablagen in Abhängigkeit von der Energie um bis zu ca. 2.5 mm variieren können. Außerdem fällt auf, daß die Orbitamplituden mit der Energie wachsen, was eine Korrektur bei hohen Energien zusätzlich erschwert.

Die  $z$ -Orbitablagen sind weniger energieabhängig, die Änderungen betragen unter einem Millimeter. Allerdings ist der Zusammenhang zwischen Strahlenergie und Orbit-Änderung nicht einfach skalierend wie bei den  $x$ -Orbitablagen. Möglicherweise sind diese Strahlage-Änderungen für die Beschleunigung polarisierter Elektronen schon zu groß. Dann muß das Korrektursystem in die Lage versetzt werden, Closed-Orbit-Bewegungen auf den Energierampen auszugleichen. Darauf wird in Kapitel 7.3 ein wenig näher eingegangen.

## 6.7 Tests der Software zur Orbit-Korrektur

### 6.7.1 Test und Vergleich der globalen Korrekturalgorithmen

Es wurden die verschiedenen ins neue Kontrollsystem implementierten Korrekturalgorithmen getestet und miteinander verglichen: der Least-Square-Algorithmus (Eigenwert-Toleranz  $10^{-2}$ ) mit theoretischer und gemessener Orbit-Response-Matrix, der MICADO-Algorithmus (mit 7 Korrektoren) und eine Korrektur der Orbitharmonischen 3 bis 6 (Eigenwert-Toleranz ebenfalls  $10^{-2}$ ). Dabei wurde jeweils nur ein Iterationsschritt durchgeführt, um die Algorithmen besser miteinander vergleichen zu können. Die Messungen wurden bei 2.3 GeV Strahlenergie durchgeführt.

Wie erwartet lieferte die Least-Square-Korrektur mit gemessener Orbit-Response-Matrix die besten Ergebnisse, gefolgt von der Least-Square-Korrektur mit theoretischer Matrix, MICADO und der Harmonischen-Korrektur. Tabelle 6.1 zeigt die Zahlenwerte. Man sieht auch, daß die Simulation die Qualität der anschließenden Korrektur relativ gut vorausgesagt hat.

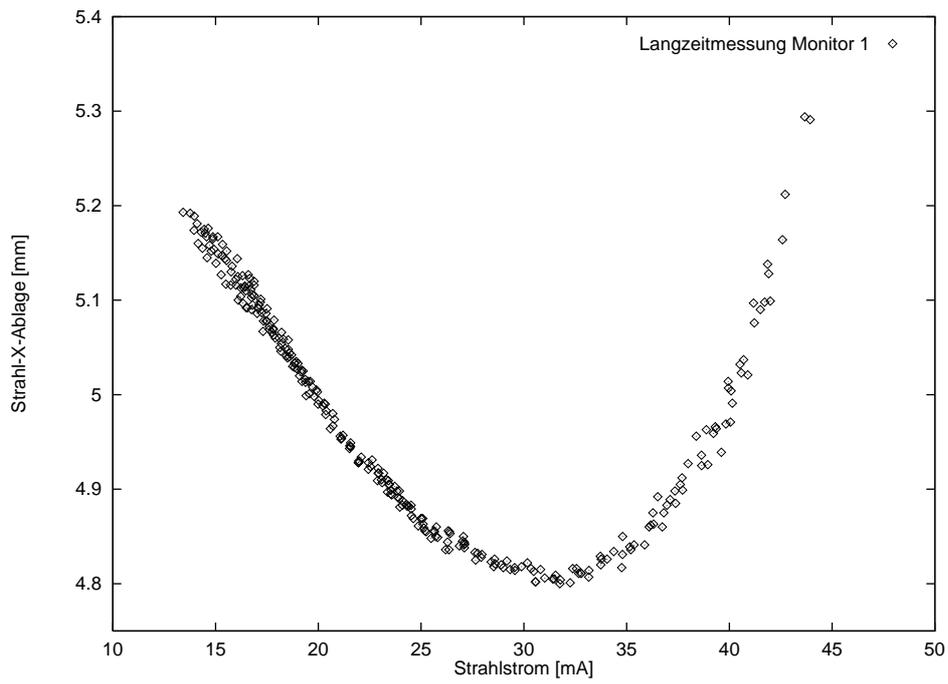
Algorithmus	vorher		simuliert		nacher		RMS-Güte
	$x$ -MAX [mm]	$x$ -RMS [mm]	$x$ -MAX [mm]	$x$ -RMS [mm]	$x$ -MAX [mm]	$x$ -RMS [mm]	
Least Square gem.	6.824	3.145	0.767	0.279	0.629	0.290	10.8
Least Square theo.	6.833	3.062	0.505	0.139	0.890	0.408	7.5
MICADO	6.823	3.109	1.018	0.383	1.158	0.487	6.4
Harmonischen-Korr.	6.855	3.064	1.633	0.706	1.372	0.591	5.2

Tabelle 6.1: Vergleich der verschiedenen Orbit-Korrekturalgorithmen

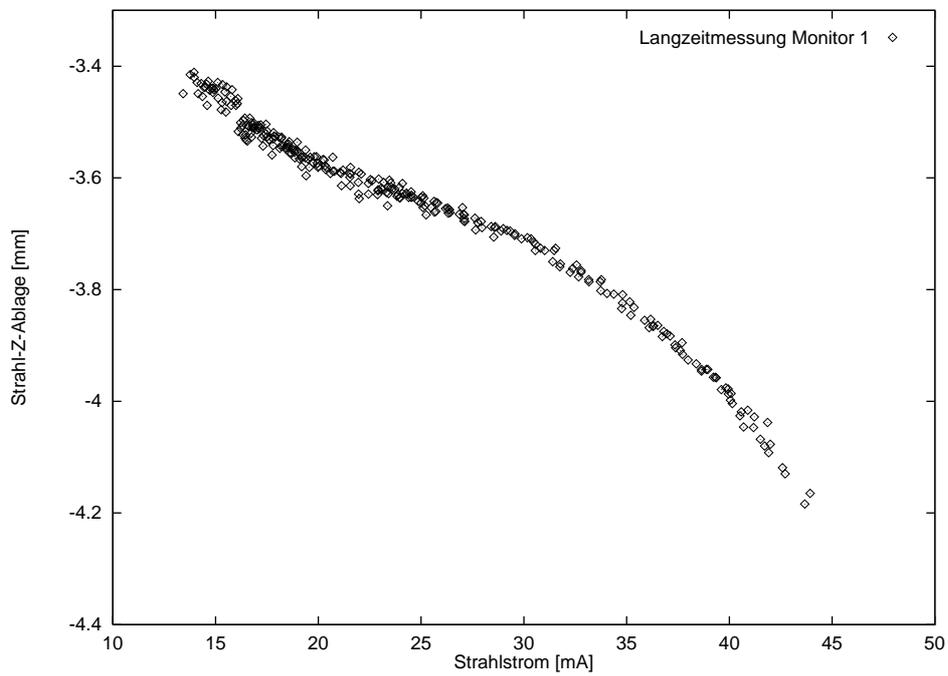
### 6.7.2 Test der Routine zur Berechnung allgemeiner Orbit-Beulen

Zum Austesten der allgemeinen Beam-Bump-Routine wurde eine Reihe von willkürlichen Beulen definiert und gesetzt. In Bild 6.8 sind zwei Beispiele dargestellt:

1. *Beule*: Monitor 20, Korrektoren: 24, 25, 27 ,  
vor Korrektur: 3.107 mm, eingestellte Soll-Ablage: 0.000 mm, nach Korrektur: -0.141 mm;
2. *Beule*: Monitor 1, Korrektoren 27, 30, 32, 1 ,  
vor Korrektur: 4.397 mm, eingestellte Soll-Ablage: 3.000 mm, nach Korrektur: 2.767 mm.

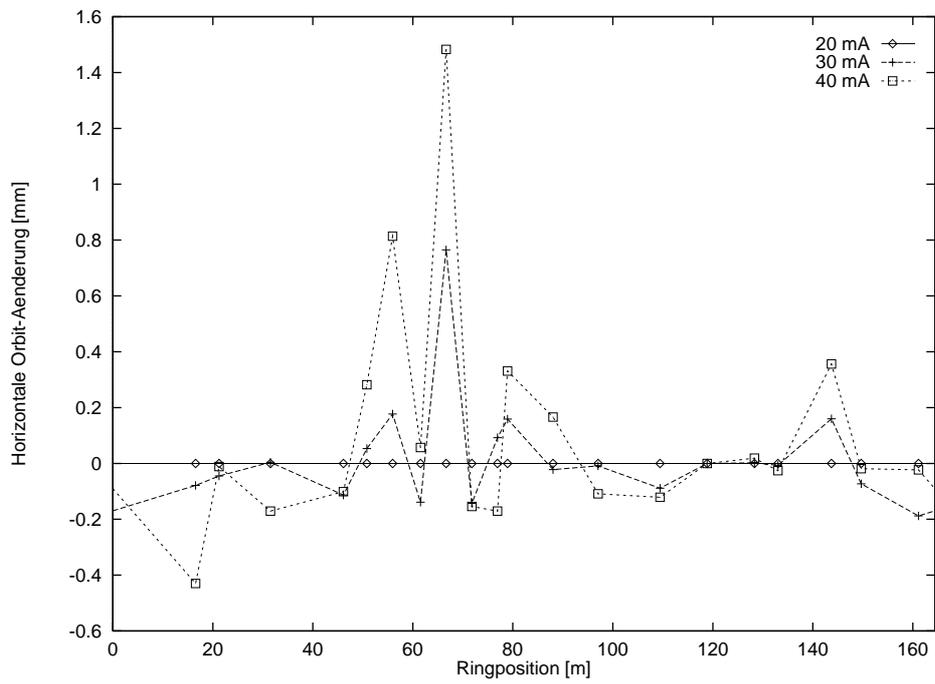


(a)  $x$ -Ablage gegen Strahlstrom

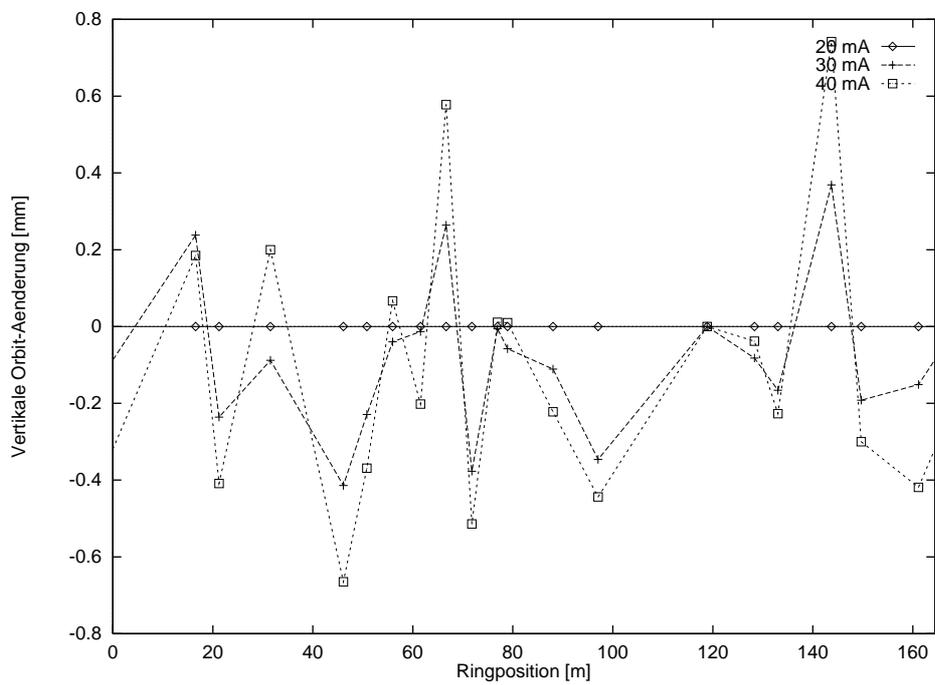


(b)  $z$ -Ablage gegen Strahlstrom

Abbildung 6.5: Korrelation zwischen Strahlstrom und Orbitablage

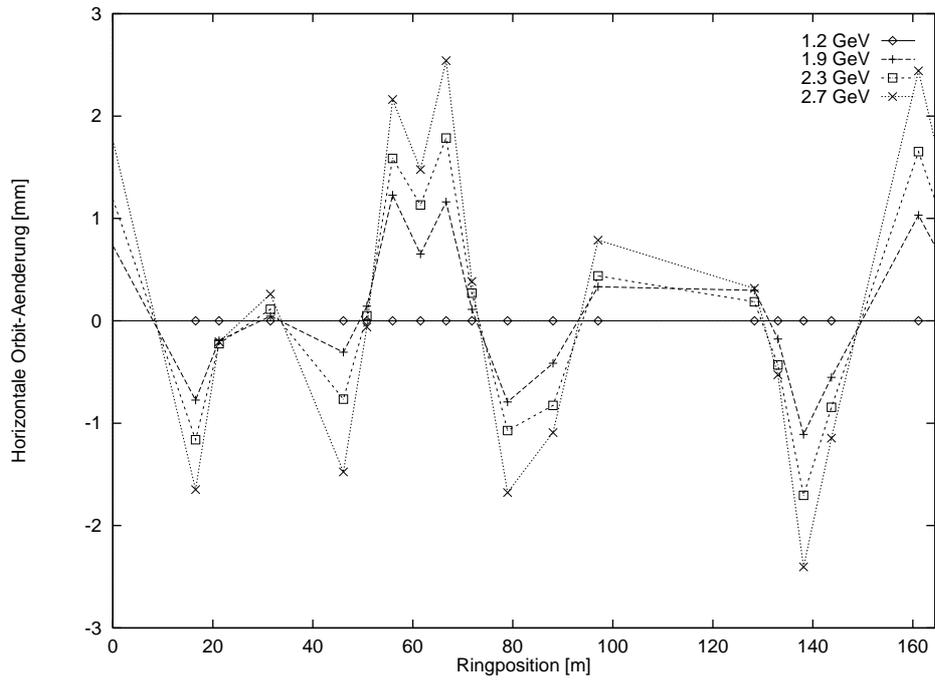


(a) Gemessene  $x$ -Orbit-Änderungen

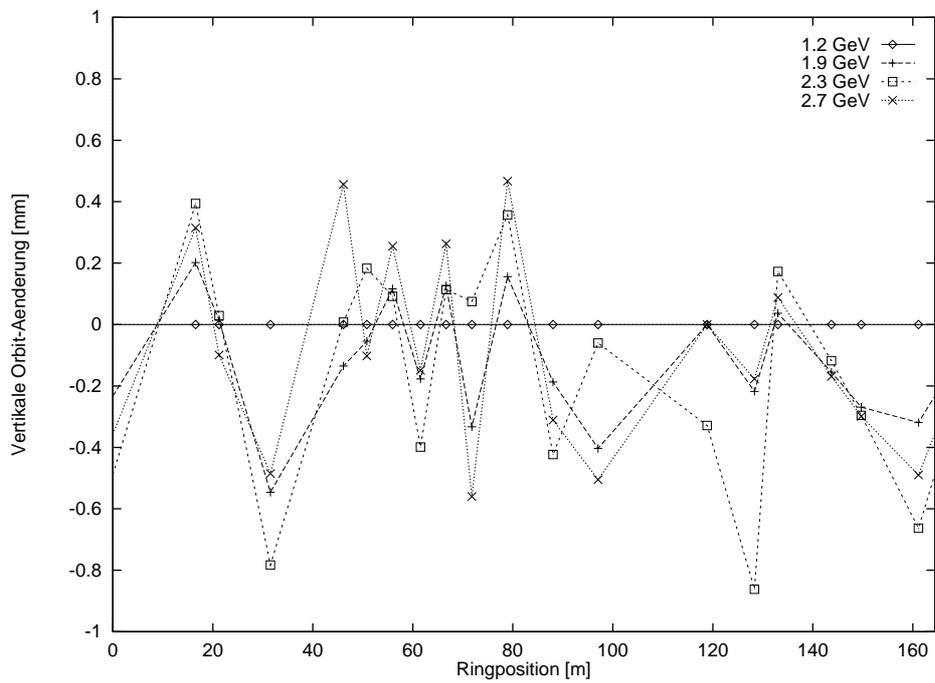


(b) Gemessene  $z$ -Orbit-Änderungen

Abbildung 6.6: Einfluß des Strahlstroms auf den Closed-Orbit



(a) Gemessene  $x$ -Orbit-Änderungen



(b) Gemessene  $z$ -Orbit-Änderungen

Abbildung 6.7: Einfluß der Strahlenergie auf den Closed-Orbit

Man erkennt, daß die Beulen zum Teil nicht exakt geschlossen sind, d.h. die Strahlablagen außerhalb der Beulen beeinflußt werden. Dies ist auf Unterschiede der theoretischen und der realen Strahloptik und auf zum Teil nicht präzise geeichte Korrektoren zurückzuführen.

Die zweite Beule ist ein Beispiel dafür, daß dem Algorithmus mehr Korrektoren als durch die Anzahl der Randbedingungen bestimmt zur Verfügung gestellt werden können. Dies minimiert die Korrektorstärken; bei Verwendung von nur drei Korrektoren ergaben sich zu große Kickwinkel.

Es ist auch zu beachten, daß jeweils nur ein Iterationsschritt durchgeführt wurde. Abweichungen der gemessenen Ablagen von den eingestellten Sollablagen nach der Korrektur lassen sich durch weitere Iterationen verkleinern.

### 6.7.3 Test der Harmonischen-Korrektur

Die Harmonischen-Korrektur wurde einem genaueren Test unterzogen: Es wurde das gemessene Orbit-spektrum *vor* der Korrektur, das Spektrum nach *simulierter* Korrektur und das gemessene Spektrum *nach* der Korrektur für die Orbitharmonischen 3, 4, 5 und 6 aufgenommen. Die Ergebnisse sind im Bild 6.9 dargestellt, die genauen Zahlenwerte sind im Anhang A.5 aufgelistet.

Es ist zu erkennen, daß die Simulation das Orbit-spektrum nach der Korrektur im allgemeinen gut voraussagt. Das bedeutet, daß die simulierte Strahloptik gut der tatsächlichen entspricht, insbesondere die Orbit-Response-Matrix ist gut bekannt.

Die in Bild 6.9 dargestellten Spektren sind jeweils auf die stärkste Harmonische normiert; dies ist ein Grund, weshalb die zu korrigierende Harmonische nach der Korrektur manchmal noch relativ stark zu sehen ist.

### 6.7.4 Test des Dispersionsfits

Auch der Dispersionsfit wurde kurz ausgetestet. Die Aufgabe des Dispersionsfits ist es, die Orbit-Meßwerte an eine Dispersionsbahn anzuschmiegen, um ein  $\Delta p/p$  und daraus eine Fehlanpassung der HF-Frequenz  $\Delta f$  zu bestimmen.

Der Dispersionsfit lieferte bei unkorrigiertem Orbit als Ergebnis eine Fehlanpassung der HF-Frequenz  $\Delta f = 1.60$  kHz. Nach Verfahren der HF-Frequenz auf 10 kHz über normal wurde als Fehlanpassung  $\Delta f = 11.11$  kHz, und nach Verfahren auf 1 kHz unter normal  $\Delta f = 0.25$  kHz berechnet. Die Genauigkeit des Fits liegt also bei etwas unter 1 kHz.

## 6.8 Iterierte Orbit-Korrektur, bei verschiedenen Energien

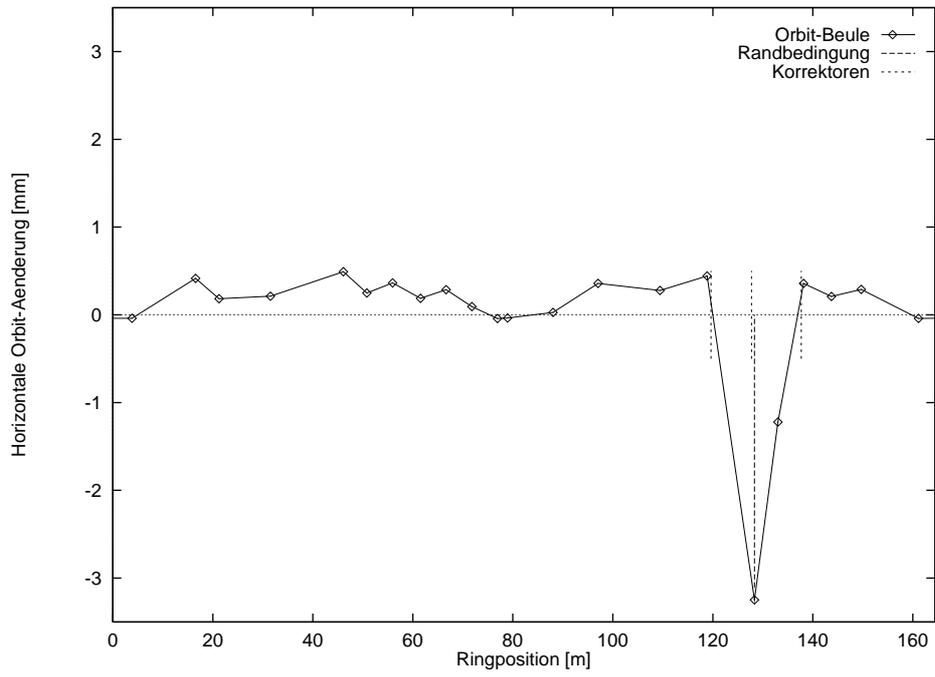
Mit weiteren Iterationsschritten läßt sich der Orbit weiter verbessern. Nach drei bis vier Korrekturen ist normalerweise das Optimum erreicht.

Der  $x$ -Orbit wurde bei 1.2 GeV, 1.9 GeV, 2.3 GeV und 2.7 GeV auf diese Weise korrigiert (Tabelle 6.2, sowie Bilder 6.11 und 6.12). Die Kickstärken der Korrektoren sind qualitativ ähnlich, da sich die Energieabhängigkeit des Orbits lediglich in einer Skalierung ausdrückt (Abschnitt 6.6.3).

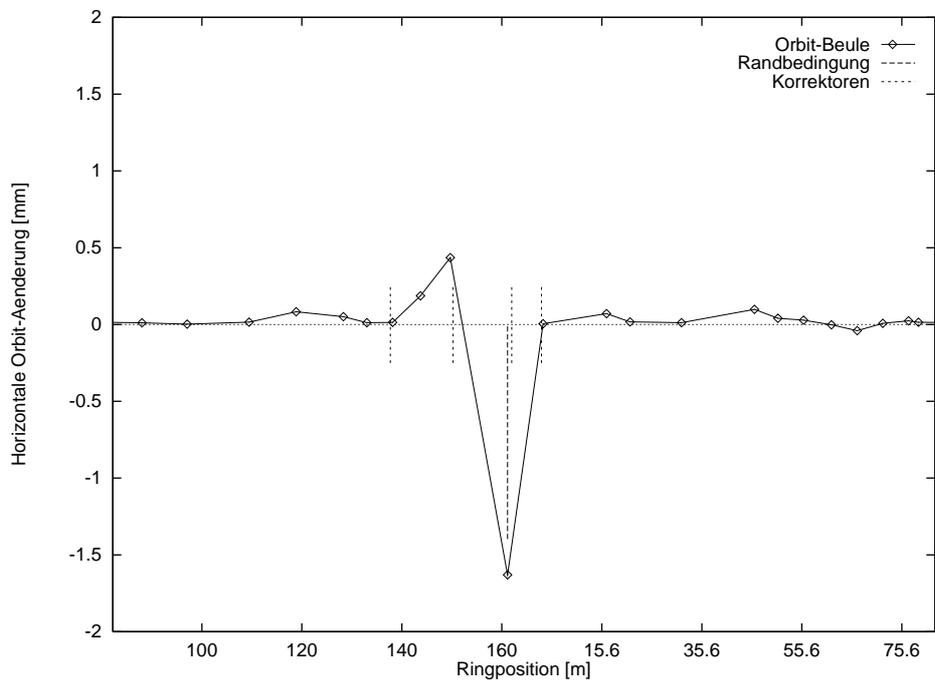
Bis 2.3 GeV läßt sich der  $x$ -Orbit hervorragend korrigieren; die Restablagen sind besser als der aus den MAD-Simulationen ermittelte Erwartungswert (Tabelle 3.2).

Bei 2.7 GeV geraten einige Korrektoren an ihre Aussteuergrenze, daher die vergleichsweise großen Restablagen. Um die Orbits auch bei höheren Energien zu korrigieren, sind gezielte transversale Quadrupol-Verschiebungen notwendig. Zur Berechnung der nötigen Verschiebungen steht eine Kontrollsystem-Applikation zur Verfügung (siehe Kapitel 5.5).

Kurz getestet wurde auch, wie sich der Orbit bei einer Korrektur verhält, in der für die Korrekturberechnungen ein Monitor herausgenommen wurde. So hat sich bei Nichtbeachtung von Monitor 2 die Ablage dort von 3.839 mm auf 5.517 mm erhöht, während der Orbit an den anderen Monitoren wie gehabt auf nahezu Null korrigiert wurde (Bild 6.10). Dies demonstriert wie die Simulationen in Kapitel 3, daß eine unkontrollierte Orbit-Beule zu erwarten ist, wenn die Abstände der Monitore zueinander zu groß sind.

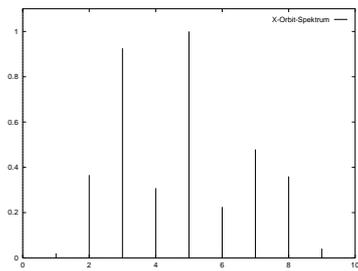


(a) Beule an Monitor 20

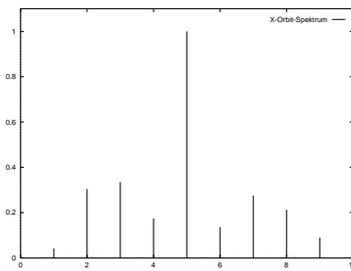


(b) Beule an Monitor 1

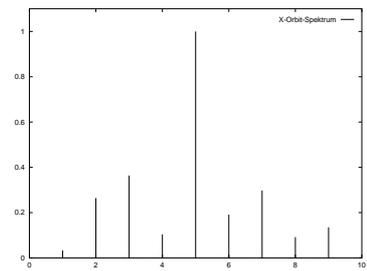
Abbildung 6.8: Einige Beispiele für Orbit-Beulen



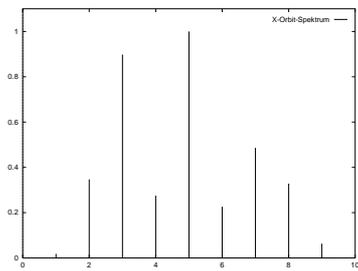
(a) Vor Korrektur 3.  
Harmonischer (gemessen)



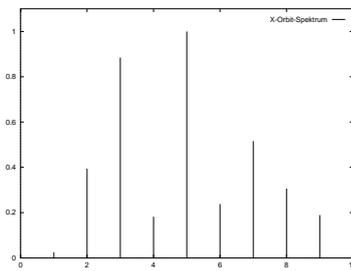
(b) Nach Korrektur 3.  
Harmonischer (simuliert)



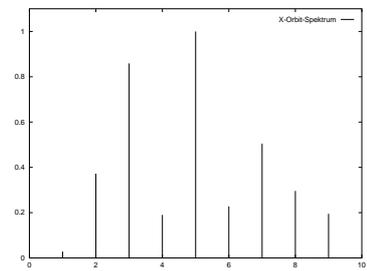
(c) Nach Korrektur 3.  
Harmonischer (gemessen)



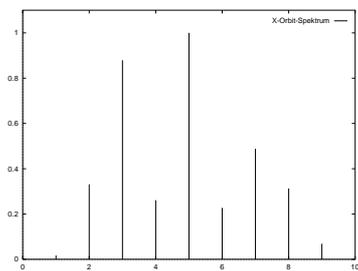
(d) Vor Korrektur 4.  
Harmonischer (gemessen)



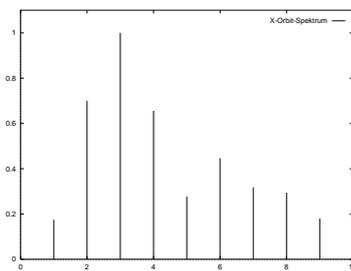
(e) Nach Korrektur 4.  
Harmonischer (simuliert)



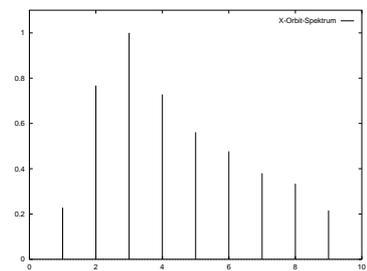
(f) Nach Korrektur 4.  
Harmonischer (gemessen)



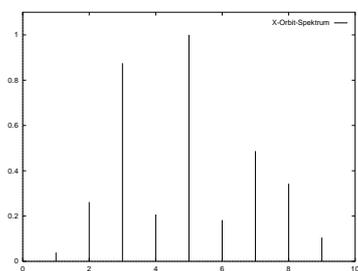
(g) Vor Korrektur 5.  
Harmonischer (gemessen)



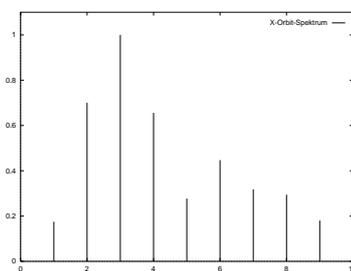
(h) Nach Korrektur 5.  
Harmonischer (simuliert)



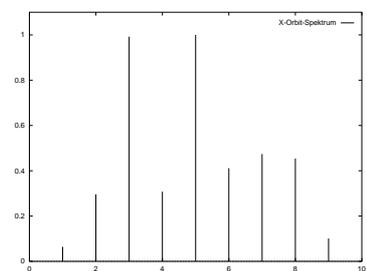
(i) Nach Korrektur 5.  
Harmonischer (gemessen)



(j) Vor Korrektur 6.  
Harmonischer (gemessen)



(k) Nach Korrektur 6.  
Harmonischer (simuliert)



(l) Nach Korrektur 6.  
Harmonischer (gemessen)

Abbildung 6.9: Orbitspektren bei Korrektur ausgewählter Harmonischer

Energie	Vorher		Nacher		RMS-Güte
	$x$ -MAX [mm]	$x$ -RMS [mm]	$x$ -MAX [mm]	$x$ -RMS [mm]	
1.2 GeV	5.139	2.246	0.637	0.182	12.3
1.9 GeV	6.367	2.839	0.537	0.160	17.7
2.3 GeV	6.725	2.957	0.447	0.148	20.0
2.7 GeV	7.301	3.482	0.702	0.350	9.9

Tabelle 6.2:  $x$ -Orbits vor und nach mehreren LSQ-Korrekturen bei verschiedenen Energien

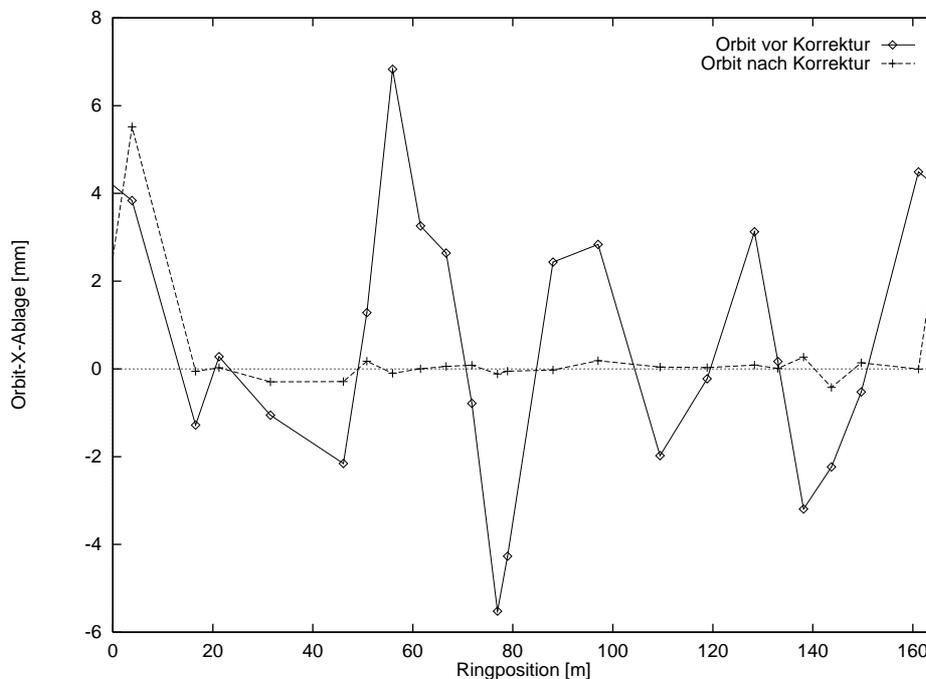


Abbildung 6.10: Orbit vor und nach einer Korrektur unter Nichtberücksichtigung eines Monitors

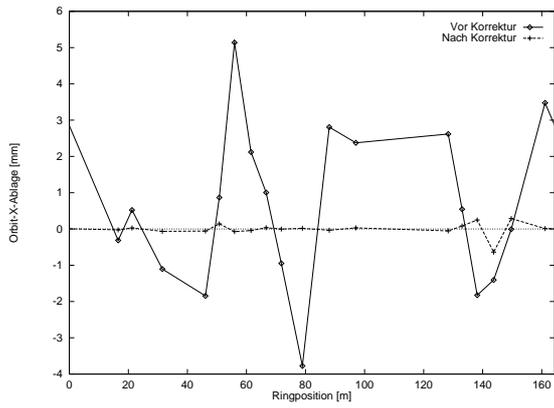
## 6.9 Der $z$ -Orbit

Die Messung des  $z$ -Orbits lieferte unsinnige Meßwerte, und zwar scheint der Orbit systematisch nach unten verschoben zu sein. Nachforschungen haben ergeben, daß die Ursache für die fehlerhaften Meßwerte eine falsche Eichung der Monitore ist. Es scheint ein Offset in den gemessenen Quotienten  $Quot_x$  und  $Quot_z$  vorzuliegen. Zur korrekten Behebung des Fehlers müssen sämtliche Monitorelektroniken neu geeicht werden.

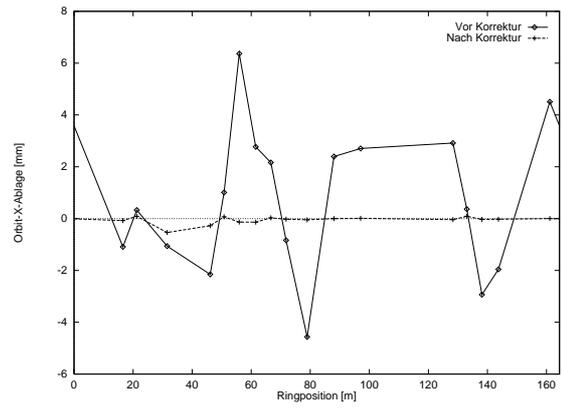
Ein probeweises Abziehen eines Lage-Offsets als erste Näherung zur Korrektur der Meßwerte läßt den Wertebereich der Messungen vernünftig erscheinen, die Meßwerte oszillieren aber zu stark (Bild 6.13). Eine ordentliche Orbit-Korrektur ist mit diesen Meßwerten auch nicht möglich:

Messung	$z_{rms}$ [mm]	$z_{max}$ [mm]
vor Korrektur	3.298	6.129
nach Korrektur	1.738	3.790

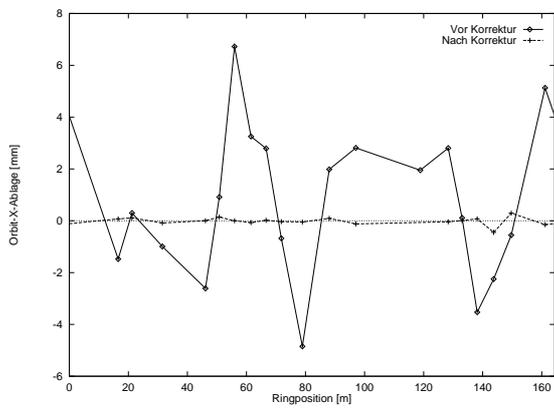
Die Standardabweichung wurde also ungefähr halbiert. Die Strahlqualität (Lebensdauer, Emittanz) wurde damit aber nicht verbessert, und einige Korrektoren gingen schon bei einer niedrigen Strahlenergie von 1.2 GeV an die Ansteuergrenze. Das ist ein deutlicher Indikator dafür, daß die gemessenen Orbitablagen keinen Bezug zum realen Closed-Orbit haben.



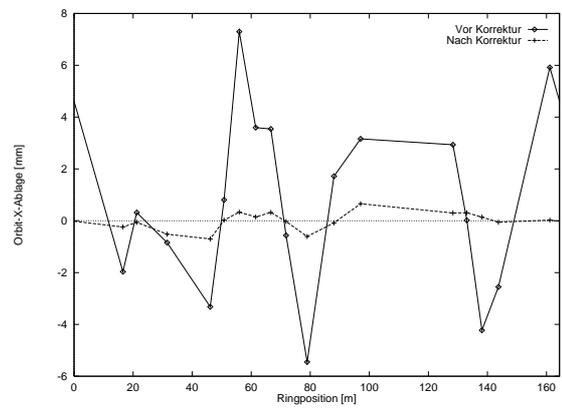
(a) 1.2 GeV



(b) 1.9 GeV

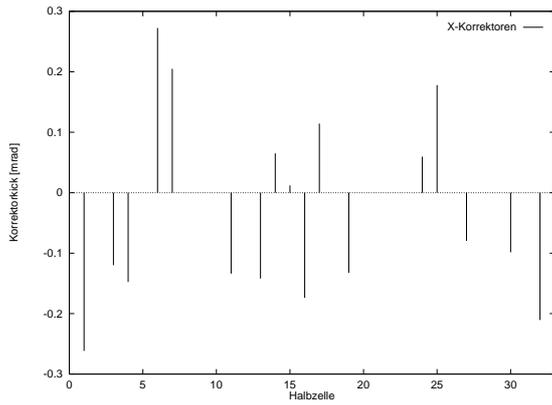


(c) 2.3 GeV

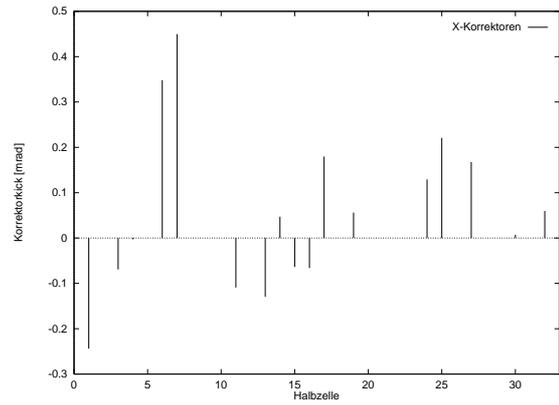


(d) 2.7 GeV

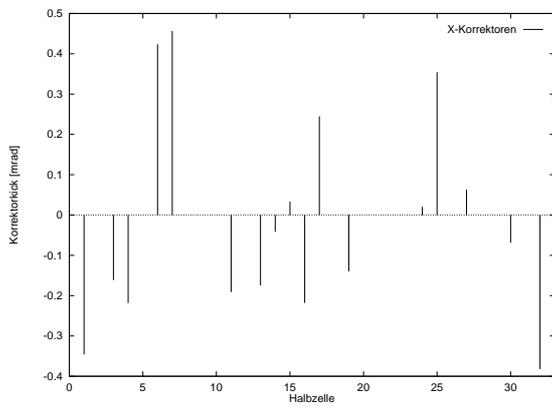
Abbildung 6.11:  $x$ -Orbits vor und nach mehreren LSQ-Korrekturen bei verschiedenen Energien



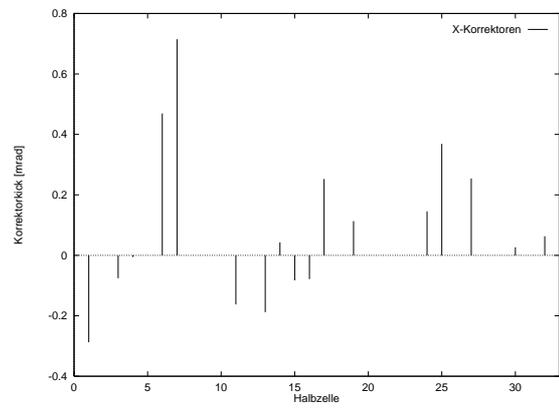
(a) 1.2 GeV



(b) 1.9 GeV



(c) 2.3 GeV



(d) 2.7 GeV

Abbildung 6.12:  $x$ -Korrektorstärken der obigen Orbit-Korrekturen

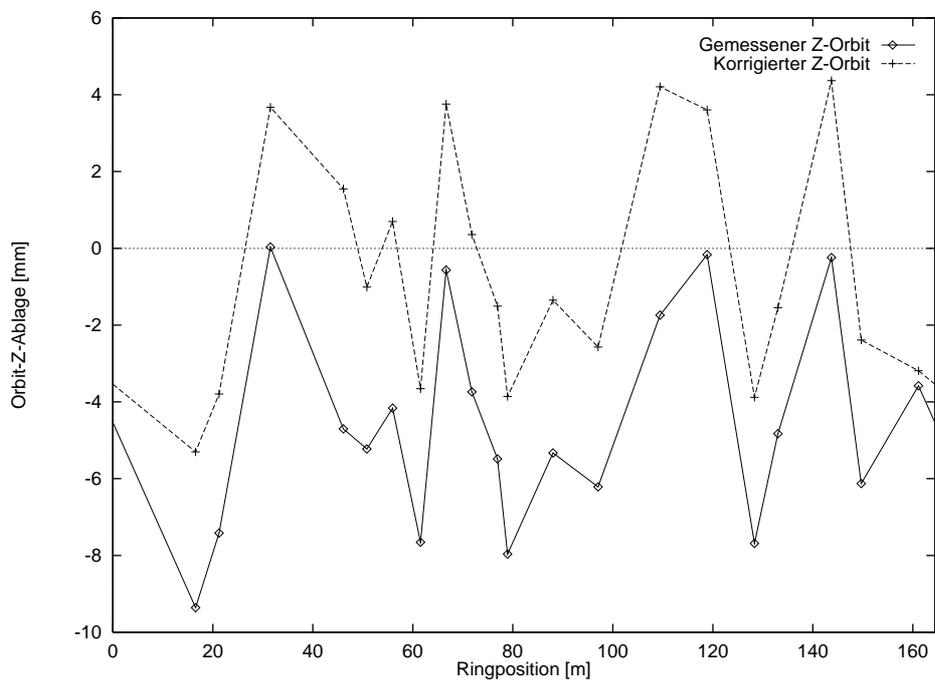


Abbildung 6.13: z-Orbit-Meßwerte vor und nach mutmaßlicher Offset-Korrektur

# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit war die Korrektur des Closed-Orbits an ELSA mit dem neuen Kontrollsystem. Dazu war die vorhandene Software zu komplettieren, und es wurde neue Software entwickelt. Eine wichtige Komponente war dabei die Entwicklung eines speziellen Regelexperten, der die Orbitkorrektur verwaltet.

Es wurden Simulationen gemacht, die Informationen über mögliche Orbitabweichungen in ELSA vor und nach Korrekturen lieferten. Aus den Ergebnissen folgt die Notwendigkeit einer besseren Bestückung mit Monitoren.

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden auch eine Reihe von Messungen zum Austesten der Monitore, Korrektoren und Software, sowie einige systematische Untersuchungen der Eigenschaften des Closed-Orbits durchgeführt.

Im Laufe der Zeit ergaben sich leider eine Reihe von technischen Schwierigkeiten mit der Hardware zur Orbitmessung. Daher konnte das gesteckte Ziel, die Korrektur des vertikalen Orbit, auch nicht voll erreicht werden.

Die Hardware wurde zwar in einigen Punkten verbessert, beispielsweise eine direkte Ansteuerung durch einen VME-Rechner als Ersatz für ein zwischengeschaltetes Feldbussystem, der Aufbau eines tragbaren Diagnosegeräts und einer neuen Eichtisch-Ansteuerung. Dennoch kann das System nicht die künftigen Anforderungen an präzise, schnelle Orbit-Messungen erfüllen, so daß die Entwicklung einer neuen Elektronik begonnen wurde. Nach der Installation und Eichung der neuen Elektronik steht einer guten Korrektur des Orbits in beiden Strahlebenen nichts mehr im Wege.

Weitere begonnene Hardware-Arbeiten sind der Aufbau von neuen Pickup-Elektroden mit einem neuen Design, das in Quadrupole eingebaut werden kann, und die Installationen für Strahllagemessungen mit der Quadrupol-Methode. Letztere wurde an einem Quadrupol ausgetestet.

### 7.2 Schnelles Feedback-System

Die neue Monitorelektronik wurde auf eine hohe Meßrate ausgelegt, um ein schnelles Feedback-System zu ermöglichen. Dies ist Gegenstand einer laufenden Promotionsarbeit. Wesentliche Motivation ist dabei das Stabilisieren der Synchrotronlicht-Quellpunkte. Messungen haben ergeben, daß der Strahl Schwingungen mit einer sich verändernden Frequenz um die 30 Hz ausführt. Die wahrscheinliche Ursache ist Ioneneinfang.

Es sind Untersuchungen im Gange, wie der Ioneneinfang unterdrückt werden kann. So wurden Tests mit einer gezielten Anregung des Strahls, mit partiellen Ringfüllungen und mit Clearing-Elektroden durchgeführt, die zum Teil positive Ergebnisse zeigten [Steier95]. Ein Feedback-System mit einer Bandbreite von vielleicht 1 kHz könnte die Schwingungen ausgleichen, wenn der Ioneneinfang nicht erfolgreich unterdrückt werden kann.

Für ein derart schnelles System sind allerdings nicht nur schnelle Monitore, sondern auch schnelle Korrektoren nötig. Die jetzt verwendeten Eisenmagnete sind wahrscheinlich zu langsam, auf jeden Fall ist eine komplett neue Ansteuerung notwendig.

### 7.3 Orbitkorrektur für Polarisationserhaltung

Eine weitere Motivation für eine gute Orbitkorrektur ist, wie schon erwähnt, die Unterdrückung von depolarisierenden Resonanzen während der Beschleunigung polarisierter Elektronen. Man unterscheidet verschiedene Typen von Resonanzen, wobei hier nur kurz auf die sogenannten Imperfektion-Resonanzen eingegangen werden soll. Für mehr Informationen sei auf [Jessenberger93] verwiesen.

Die Imperfektion-Resonanzen treten bei Strahlenergien auf, die ein Vielfaches von 440.5 MeV sind. Bei diesen Energien ist der Spinphasenvorschub (der Teilchenspin präzediert in Magnetfeldern, und damit in den Dipolen des Beschleunigers) in einem Umlauf durch den Beschleuniger ein ganzzahliges Vielfaches von  $2\pi$ . Unerwünschte Störfelder rufen so bei einem Teil der Elektronen Spinänderungen hervor, so daß der Strahl depolarisiert wird<sup>1</sup>. So kann der Strahl insbesondere bei Energierampen depolarisiert werden.

Solche Störfelder sind zum Beispiel die Dipolfeldkomponenten, die auf Teilchen wirken, die Quadrupole nicht zentral passieren. Damit skaliert der Einfluß der Imperfektion-Resonanzen mit dem RMS-Wert des Orbits. Da die Spinachse in Kreisbeschleunigern vertikal ist, sind hier die vertikalen Orbitabweichungen entscheidend.

Zur Vermeidung von Depolarisation ist es also notwendig, den vertikalen Orbit gut zu korrigieren und die kritischen Energien beim Rampen möglichst schnell zu kreuzen. Da auf einer Rampe eine Verschiebung des Orbit zu erwarten ist (siehe Kapitel 6.6.3), ist eine ständige Orbitkorrektur auf der Rampe wahrscheinlich von Nöten.

Zusätzlich kann man versuchen, beim Durchkreuzen der einzelnen Resonanzen die jeweilige depolarisierende Spinharmonische zu unterdrücken. Dies ähnelt der in dieser Arbeit beschriebenen Harmonischen-Korrektur, nur daß hier Spinharmonische statt Betatron-Harmonische korrigiert werden. Die Korrektur einer Spinharmonischen bewirkt normalerweise auch eine Vergrößerung der Orbitablagen, weshalb im Rahmen normaler Orbitkorrekturen selten darauf eingegangen wird.

Für die Korrektur einer Spinharmonischen sind jeweils zwei präzise und schnelle Korrektormagnete notwendig. Berechnungen zeigten, daß bei Korrektur einzelner Spinharmonischer die Orbitablagen recht stark wachsen können, so daß man jeweils nur eine Harmonische unterdrücken sollte [Jessenberger93]. Damit müssen die Korrektormagnete sehr schnell ansteuerbar sein. Die vorhandenen Eisenmagnete sind dafür nicht geeignet, so daß für diesen Zweck z.B. Luftmagnete gebaut werden müssen.

---

<sup>1</sup>Wenn die Resonanz sehr stark ist, vollziehen allerdings sehr viele Teilchen diese Spinänderung, so daß sich die Polarisation umkehrt, aber vom Betrag her erhalten bleibt.

# Anhang A

## Tabellen mit detaillierten Meßergebnissen

Informationen, unter welchen Bedingungen die Meßwerte aufgenommen wurden, sind in den entsprechenden Kapiteln dieser Arbeit zu finden.

**A.1 Pickup-Messungen (zu Kapitel 4.2)**

**A.2 Dispersions-Messungen (zu Kapitel 6.1)**

**A.3 Kickbahn-Messungen (zu Kapitel 6.3)**

**A.4 Shunt-Messungen (zu Kapitel 6.5)**

**A.5 Orbitspektren bei Korrektur ausgewählter Harmonischer  
(zu Abschnitt 6.7.3)**

Abbildung A.1: Ergebnisse der Pickup-Messungen

Monitor	Gemessene Dämpfungsfaktoren			Meffehler bei mittigem Strahl	
	$a_2$	$a_3$	$a_4$	X [mm]	Z [mm]
Eichstand	0.9986±0.0016	0.9591±0.0016	0.992±0.0016	-0.116±0.010	0.516±0.031
1	0.9633±0.0020	0.9801±0.0020	0.9806±0.0020	0.134±0.013	0.028±0.038
2	1.0980±0.0096	1.0920±0.0095	1.0150±0.0088	-0.074±0.056	-0.091±0.164
3	0.9663±0.0014	0.9424±0.0014	0.9647±0.0014	0.043±0.009	0.657±0.026
4	0.9487±0.0016	0.9741±0.0016	0.9943±0.0017	0.116±0.011	-0.216±0.031
5	0.9834±0.0032	1.0350±0.0034	0.9803±0.0032	0.258±0.021	-0.341±0.061
6	1.0590±0.0008	1.0260±0.0008	1.0120±0.0008	-0.160±0.005	0.225±0.014
7	0.9736±0.0030	0.9597±0.0030	0.9818±0.0030	0.016±0.019	0.353±0.057
8	1.0460±0.0029	1.0590±0.0029	1.0540±0.0029	-0.144±0.017	-0.699±0.051
9	1.0530±0.0023	1.0510±0.0023	1.0210±0.0022	-0.082±0.014	-0.193±0.041
10	0.9954±0.0027	0.9686±0.0026	0.9389±0.0025	0.128±0.017	0.968±0.050
11	0.9823±0.0010	1.0170±0.0011	1.0030±0.0011	0.115±0.007	-0.408±0.020
12	0.9564±0.0012	0.9501±0.0012	0.9775±0.0013	0.061±0.008	0.318±0.024
13	0.9837±0.0017	1.0320±0.0018	1.0310±0.0018	0.062±0.011	-0.834±0.031
14	0.9566±0.0014	0.9770±0.0015	0.9792±0.0015	0.153±0.009	0.005±0.027
15	1.1040±0.0020	1.0100±0.0018	1.0080±0.0018	-0.359±0.012	0.904±0.034
16	1.0250±0.0022	1.0310±0.0022	1.0890±0.0023	-0.293±0.013	-0.983±0.039
17	1.0120±0.0015	1.0410±0.0015	0.9877±0.0014	0.150±0.009	-0.180±0.027
18	1.0520±0.0037	1.0660±0.0038	1.0150±0.0036	-0.006±0.022	-0.302±0.066
19	0.9708±0.0016	0.9674±0.0016	1.0000±0.0017	-0.012±0.011	0.037±0.031
20	0.9569±0.0033	0.9900±0.0034	0.9755±0.0034	0.213±0.022	-0.094±0.063
21	0.9523±0.0028	1.0100±0.0029	0.9897±0.0029	0.250±0.018	-0.514±0.053
22	1.0500±0.0021	1.0590±0.0021	1.0620±0.0021	-0.183±0.013	-0.735±0.037
23	1.0260±0.0019	1.0290±0.0019	1.0010±0.0019	0.006±0.012	-0.044±0.035
24	1.0180±0.0031	0.9911±0.0030	0.9914±0.0030	-0.065±0.019	0.378±0.057
Prototyp	1.0210±0.0020	0.9905±0.0020	1.0220±0.0020	-0.186±0.012	0.091±0.037
Füllstruktur	0.9658±0.0013	0.9572±0.0013	0.9389±0.0013	0.198±0.009	0.775±0.025

Abbildung A.2: Ergebnisse der Dispersions-Messungen

Mon.	0 kHz [mm]	+3 kHz [mm]	+6 kHz [mm]	+9 kHz [mm]	+12 kHz [mm]	+15 kHz [mm]	+18 kHz [mm]	0 kHz [mm]	Meßergebnis [ $\mu\text{m}/\text{kHz}$ ]	Theorie [ $\mu\text{m}/\text{kHz}$ ]
1	2.940±0.013	2.914±0.016	2.857±0.010	2.828±0.015	2.785±0.021	2.777±0.032	2.719±0.019	2.637±0.021	2.0±1.3	2.3
2	5.646±0.026	5.457±0.019	5.552±0.023	5.615±0.019	5.512±0.016	5.511±0.023	5.512±0.013	5.485±0.021	5.5±1.7	2.3
3	2.344±0.017	2.332±0.025	2.315±0.020	2.399±0.018	2.313±0.026	2.351±0.029	2.391±0.032	2.256±0.039	5.7±1.9	2.4
4	-1.832±0.019	-1.971±0.008	-2.162±0.005	-2.364±0.004	-2.577±0.003	-2.792±0.002	-3.015±0.002	-1.549±0.001	-81.3±0.8	-76.7
5	0.233±0.021	0.090±0.012	-0.036±0.017	-0.114±0.016	-0.226±0.021	-0.329±0.021	-0.471±0.035	0.104±0.016	-30.7±1.6	-40.5
6	0.704±0.003	0.433±0.003	0.167±0.005	-0.078±0.005	-0.338±0.003	-0.604±0.002	-0.851±0.002	0.528±0.003	-78.1±0.2	-84.2
7	-2.047±0.030	-2.223±0.025	-2.415±0.032	-2.629±0.041	-2.854±0.042	-3.090±0.034	-3.283±0.028	-2.211±0.052	-61.3±2.7	-47.0
8	-2.040±0.015	-2.372±0.011	-2.637±0.015	-2.962±0.018	-3.249±0.018	-3.615±0.022	-3.935±0.015	-2.187±0.024	-96.2±1.3	-101
9	1.082±0.006	0.855±0.008	0.718±0.013	0.510±0.012	0.375±0.012	0.200±0.012	0.046±0.010	0.980±0.013	-53.3±0.7	-51.5
10	6.596±0.001	6.380±0.001	6.161±0.001	5.945±0.001	5.734±0.001	5.520±0.001	5.306±0.001	6.622±0.001	-73.0±0.1	-79.4
11	1.479±0.014	1.342±0.013	1.238±0.012	1.094±0.013	0.996±0.014	0.828±0.014	0.689±0.012	1.402±0.014	-39.3±1.1	-41.0
12	0.134±0.014	-0.136±0.015	-0.386±0.023	-0.604±0.015	-0.815±0.014	-0.981±0.022	-1.202±0.025	-0.014±0.018	-68.5±1.3	-82.1
13	-1.596±0.026	-1.687±0.018	-1.771±0.022	-1.881±0.030	-1.929±0.026	-1.981±0.021	-2.094±0.027	-1.741±0.018	-19.8±1.8	-22.6
14	-4.417±0.007	-4.601±0.016	-4.612±0.015	-4.650±0.013	-4.681±0.010	-4.674±0.016	-4.696±0.010	-4.807±0.014	0.90±0.8	2.4
15	-3.653±0.015	-3.690±0.011	-3.722±0.021	-3.715±0.033	-3.703±0.015	-3.734±0.014	-3.719±0.018	-3.806±0.011	3.7±1.1	2.3
17	2.391±0.010	2.121±0.010	1.712±0.014	1.456±0.015	1.178±0.025	0.980±0.019	0.718±0.023	2.110±0.016	-83.9±1.1	-76.1
18	-2.039±0.024	-2.229±0.023	-2.447±0.025	-2.641±0.021	-2.875±0.023	-3.001±0.037	-3.259±0.023	-1.950±0.036	-71.9±2.1	-73.3
19	-1.678±0.013	-1.997±0.012	-2.360±0.007	-2.746±0.024	-3.231±0.009	-3.564±0.014	-3.871±0.016	-2.202±0.015	-102.3±1.0	-101
20	2.101±0.021	1.696±0.026	1.269±0.031	0.915±0.020	0.581±0.027	0.244±0.031	-0.176±0.032	1.853±0.044	-114.4±2.1	-101
21	0.377±0.011	0.232±0.012	0.066±0.007	-0.079±0.013	-0.257±0.009	-0.384±0.008	-0.597±0.016	0.321±0.009	-49.8±0.8	-51.5
22	-1.279±0.016	-1.503±0.026	-1.810±0.017	-2.032±0.019	-2.249±0.016	-2.414±0.027	-2.527±0.029	-1.255±0.012	-76.4±1.5	-79.3
23	-1.516±0.017	-1.615±0.016	-1.741±0.010	-1.871±0.013	-1.954±0.023	-1.998±0.007	-2.111±0.010	-1.500±0.036	-34.9±1.5	-41.0
24	-0.210±0.003	-0.399±0.004	-0.565±0.005	-0.747±0.006	-0.919±0.007	-1.093±0.008	-1.273±0.004	-0.173±0.007	-60.7±0.4	-81.6

Abbildung A.3: Ergebnisse der Kickbahn-Messungen

Mon.	Korr.	0 mA [mm]	100 mA [mm]	200 mA [mm]	300 mA [mm]	400 mA [mm]	500 mA [mm]	0 mA [mm]	Meßergebnis [mm/A*GeV]	Eichfaktor [A/mrad/GeV]
1	1	-3.272±0.009	-3.127±0.003	-3.004±0.002	-2.899±0.002	-2.788±0.003	-2.673±0.002	-3.144±0.002	0.940±0.016	1.374±0.023
3	3	-4.947±0.013	-4.736±0.008	-4.536±0.011	-4.347±0.012	-4.174±0.012	-4.012±0.013	-4.901±0.010	1.812±0.035	1.354±0.026
4	1	-9.661±0.007	-9.578±0.007	-9.475±0.007	-9.377±0.004	-9.280±0.004	-9.176±0.005	-9.729±0.005	1.086±0.018	1.352±0.022
5	3	-7.123±0.009	-6.628±0.009	-6.215±0.006	-5.725±0.005	-5.212±0.005	-4.737±0.007	-7.111±0.007	4.734±0.023	1.519±0.007
7	1	-0.157±0.005	-0.427±0.006	-0.690±0.007	-0.989±0.006	-1.292±0.005	-1.574±0.005	-0.043±0.006	-3.024±0.015	1.582±0.007
8	3	-5.685±0.003	-5.720±0.004	-5.755±0.005	-5.795±0.004	-5.827±0.005	-5.867±0.005	-5.578±0.007	-0.540±0.012	1.703±0.038
9	1	-5.127±0.005	-4.854±0.003	-4.570±0.004	-4.294±0.004	-4.046±0.003	-3.798±0.005	-4.980±0.002	2.444±0.012	1.475±0.007
10	3	-4.407±0.003	-4.141±0.002	-3.893±0.003	-3.629±0.003	-3.370±0.004	-3.111±0.004	-4.330±0.004	2.454±0.010	1.312±0.005
11	3	-7.168±0.011	-6.741±0.007	-6.346±0.003	-6.007±0.009	-5.627±0.007	-5.258±0.011	-6.942±0.011	3.410±0.030	1.150±0.010
12	1	-1.019±0.004	-1.128±0.003	-1.218±0.003	-1.313±0.003	-1.400±0.002	-1.474±0.002	-1.116±0.004	-0.754±0.010	2.449±0.032
13	3	-4.198±0.005	-4.678±0.003	-5.207±0.005	-5.690±0.008	-6.176±0.007	-6.727±0.004	-4.101±0.003	-5.217±0.014	1.395±0.004
14	3	-5.772±0.002	-5.913±0.003	-6.049±0.002	-6.180±0.002	-6.304±0.003	-6.424±0.003	-5.821±0.002	-1.241±0.007	2.388±0.207
15	3	-7.788±0.003	-7.960±0.003	-8.119±0.003	-8.280±0.002	-8.449±0.005	-8.607±0.004	-7.846±0.003	-1.538±0.010	1.359±0.009
17	3	-6.475±0.005	-6.191±0.004	-5.916±0.006	-5.673±0.006	-5.424±0.004	-5.180±0.003	-6.416±0.004	2.485±0.013	1.084±0.035
19	1	-10.587±0.015	-10.416±0.012	-10.259±0.009	-10.093±0.007	-9.937±0.006	-9.799±0.003	-10.651±0.008	1.692±0.033	1.115±0.022
20	1	-7.775±0.005	-7.720±0.005	-7.658±0.004	-7.609±0.007	-7.558±0.006	-7.548±0.016	-7.712±0.006	0.427±0.019	1.189±0.053
22	1	-2.385±0.006	-2.554±0.006	-2.723±0.004	-2.914±0.004	-3.101±0.006	-3.283±0.003	-2.418±0.007	-1.744±0.017	1.269±0.012
23	3	-0.193±0.004	-0.722±0.003	-1.273±0.006	-1.884±0.003	-2.434±0.003	-2.994±0.005	-0.216±0.006	-5.605±0.012	1.195±0.003
24	1	-6.351±0.002	-6.274±0.002	-6.199±0.001	-6.125±0.002	-6.057±0.002	-5.988±0.003	-6.312±0.003	0.669±0.007	1.771±0.019

Vor Orbit-Korrektur

Mon.	$x$ -Änderung [mm]	$z$ -Änderung [mm]	$x$ -Ablage im Quadrupol [mm]	$z$ -Ablage im Quadrupol [mm]
1	-0.016	-0.373	-0.442	-5.627
4	0.037	0.280	-0.838	-5.385
7	-0.013	-0.511	-0.642	-5.191
8	0.021	0.077	-0.645	-4.056
9	0.019	0.638	-0.913	-5.669
10	0.0005	0.326		-6.954
12	0.655	-0.249		-6.412
13	-0.001	-0.659		-5.713
18	-0.014	-1.441	-0.418	
20	0.019	0.235	-0.663	-5.846

Nach horizontaler Orbit-Korrektur

Mon.	$x$ -Änderung [mm]	$z$ -Änderung [mm]	$x$ -Ablage im Quadrupol [mm]	$z$ -Ablage im Quadrupol [mm]
1	-0.018	-0.402	-0.485	-6.067
4	0.024	0.341	-0.539	-6.676
5	0.005	0.545	-0.745	-6.923
7	-0.012	-0.532	-0.648	-5.050
8	0.022	0.098	-0.669	-4.240
9	0.014	0.612	-0.682	-5.450
10	0.007	0.271	-0.266	-6.149
12	-0.008	0.203	-0.188	
13	-0.004	-0.650	-0.201	-5.884
17	-0.013	0.117		-6.811
20	-0.012	0.250		-6.258
22	0.019	-0.633	-0.758	
23	-0.124	0.679		-5.525

Abbildung A.4: Gemessene Ablagenänderungen durch 5%-Shunt in D27

Korrektur 3. Harmonische			
Harmonische	Vor Korrektur	Nach Korrektur (simuliert)	Nach Korrektur (gemessen)
1	0.020	0.042	0.033
2	0.366	0.304	0.264
3	0.926	0.335	0.364
4	0.308	0.175	0.104
5	1.000	1.000	1.000
6	0.225	0.136	0.191
7	0.479	0.275	0.298
8	0.360	0.212	0.092
9	0.041	0.089	0.135
Korrektur 4. Harmonische			
Harmonische	Vor Korrektur	Nach Korrektur (simuliert)	Nach Korrektur (gemessen)
1	0.018	0.025	0.028
2	0.347	0.394	0.372
3	0.898	0.885	0.859
4	0.275	0.182	0.190
5	1.000	1.000	1.000
6	0.226	0.238	0.228
7	0.486	0.516	0.505
8	0.328	0.306	0.296
9	0.063	0.189	0.195
Korrektur 5. Harmonische			
Harmonische	Vor Korrektur	Nach Korrektur (simuliert)	Nach Korrektur (gemessen)
1	0.017	0.175	0.228
2	0.331	0.700	0.767
3	0.879	1.000	1.000
4	0.261	0.656	0.728
5	1.000	0.277	0.561
6	0.227	0.447	0.477
7	0.488	0.318	0.380
8	0.313	0.294	0.334
9	0.069	0.180	0.216
Korrektur 6. Harmonische			
Harmonische	Vor Korrektur	Nach Korrektur (simuliert)	Nach Korrektur (gemessen)
1	0.039	0.040	0.064
2	0.262	0.306	0.296
3	0.875	0.976	0.992
4	0.207	0.333	0.308
5	1.000	1.000	1.000
6	0.182	0.410	0.411
7	0.487	0.469	0.474
8	0.343	0.433	0.454
9	0.105	0.086	0.101

Abbildung A.5: Orbitspektren bei Korrektur ausgewählter Harmonischer

# Literaturverzeichnis

- [Althoff68] Althoff, K. H. et al.: *The 2.5 GeV Electron Synchrotron of Bonn University*, Nuclear Instruments and Methods 61(1968) pp. 1-30
- [Anders95] Anders, W.: *Faxe über die BESSY-Monitorelektronik*, 6.4.1995 und 24.5.1995
- [Autin73] Autin, B. und Marti, Y.: *Closed orbit correction of a.g. machines using a small number of magnets*, Genf 1973, CERN ISR-MA/73-17
- [Autin84] Autin, B.: *Lattice perturbations*, Genf 1984, CERN/PS/84-22(AA)
- [Bergoz95] Bergoz, J.: *Fax über die Bergoz-Monitorelektronik*, 29.4.1995
- [Borer83] Borer, J., Hofmann, A., Koutchouk, J.-P., Risselda, T. und Zotter, B.: *Measurements of betatron phase advance and beta function in the ISR*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 4, August 1983
- [Brinker94] Brinker, F., Heisterhagen, R. und Wille, K.: *Die Elektronik des Strahllagemonitors für DELTA*, DELTA Dortmund 1994, Int. Rep. 92-15
- [Brinker95] Brinker, F.: *Calibration of the linac BPM's with respect to the magnetic axis of the quadrupoles*, S-Band Meeting DESY 1995
- [Dinev90] Dinev, D.: *Simulation and correction of the closed orbit in the cooler synchrotron COSY*, Forschungszentrum Jülich 1990, Jül-2406
- [Friedman94] Friedman, A. und Bozoki, E.: *Neural networks and orbit control in accelerators*, Brookhaven National Laboratory 1994, in EPAC 94, Vol. 2
- [Friedman95] Friedman, A. und Bozoki, E.: *Eigenvector method for optimized orbit correction*, Brookhaven National Laboratory 1994
- [Geisler94] Geisler, A., Ridder, M. und Schmidt, T.: *The pulsed-wire method*, DELTA Dortmund 1994, Int. Rep. 94-4
- [Gluckstern78] Gluckstern, R. L.: *Distribution of the maximum orbit distortion for randomly distributed misalignments*, Particle Accelerators 1978, Vol. 8, pp. 203-209
- [Goetz90] Goetz, T.: *Vollautomatische Messung des ELSA-Arbeitspunktes mit EPOS*, Universität Bonn 1990, BONN-IR-90-50
- [Goetz95] Goetz, T.: *Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems zur Steuerung der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Nachbeschleunigungsbetriebs bis 3.5 GeV*, Universität Bonn 1995, BONN-IR-95-03
- [Grote95] Grote, H. und Iselin, F. C.: *The MAD Program (Methodical Accelerator Design), Version 8.16*, Genf 1995, CERN/SL/90-13 (AP)
- [Husmann88] Husmann, D. und Schwillie, W.: *ELSA - die neue Bonner Elektronen-Stretcher-Anlage*, Physikalische Blätter, 44(2), 1988
- [Jankowiak94] Jankowiak, A.: *Kalibration der DELTA-Strahllagemonitore*, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund 1994

- [Jessenberger93] Jessenberger, R.: *Erarbeitung analytischer Zusammenhänge zur Beschreibung polarisierter Teilchenstrahlen in Beschleunigern und deren Anwendung auf das Kühlersynchrotron COSY*, Forschungszentrum Jülich 1993, Jül-2754
- [Krauss86] Krauß, K.: *Experimentelle Bestimmung von Kenndaten der ELSA Dipol-Magnete*, Universität Bonn 1986, BONN-IR-86-16
- [Manukian93] Manukian, R. H.: *Trajectory correction with sequential filtering*, DESY Hamburg 1993, DESY HERA 93-07
- [Mohos95] Mohos, I.: *Beam Position Monitor Elektronik für die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA am Physikalischen Institut Bonn*, Vortrag im Seminar über Beschleunigerphysik, Universität Bonn 1995
- [Picard91] Picard, M.: *Das Steuer- und Strahldiagnosesystem EPOS und dessen Anwendung zur Messung des transversalen Phasenraums an ELSA*, Universität Bonn 1991
- [Picard95] Picard, M.: *Entwurf, Entwicklung und Inbetriebnahme eines verteilten Rechnerkontrollsystems für die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA, unter besonderer Berücksichtigung der Extraktion im Nachbeschleunigungsbetrieb bis 3.5 GeV*, Universität Bonn, BONN-IR-95-01
- [Press92] Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W. und Flannery, B.: *Numerical recipes in C*, Cambridge University Press 1992, ISBN 0-521-43108-5
- [Reichel95] Reichel, I.: *Beam position measurement by modulation of quadrupole strengths*, Genf 1995, CERN SL/Note 95-50 (BI)
- [Roejsel94] Röjsel, P.: *A beam position measurement system using quadrupole magnets magnetic centra as the position reference*, Nuclear Instruments and Methods A 343(1994) pp. 374-382
- [Schauerte90] Schauerte, W.: *Anwendung geodätischer Meßtechniken am Beispiel der Elektronen-Stretcher-Anlage (ELSA) der Universität Bonn*, Universität Bonn 1990, BONN-IR-90-23
- [Schauerte95] : *Gespräch mit Herrn Schauerte über die Genauigkeit der Justierung der ELSA-Hauptmagnete*, 2.2.1995
- [Schillo91] Schillo, M.: *Das Strahldiagnosesystem für ELSA*, Universität Bonn, BONN-IR-91-77
- [Steier95] Steier, C.: *Diplomarbeit in Vorbereitung*, Universität Bonn
- [Talman] Talman, R.: *Single particle motion*, Cornell University
- [Talman94] Talman, R.: *A universal algorithm for accelerator correction*, Cornell University 1994
- [Ursic95] Ursic, R., Denard, J.-C., Monaci, T., DeMonte, R. und Poloni, C.: *High stability beam position monitoring of ELETTRA*, Sincrotrone Trieste 1993
- [Wenzel90] Wenzel, J.: *Korrektur der Gleichgewichtsbahn an der Bonner 3,5 GeV-Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Universität Bonn 1990, BONN-IR-90-36
- [Wenzel94] Wenzel, J.: *Entwicklung und Test eines Simulators der Teilchenbewegung in der Bonner 3.5 GeV-Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Universität Bonn 1994, BONN-IR-94-13
- [Wille92] Wille, K.: *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, Teubner 1992, ISBN 3-519-03087-X
- [Zimmer86] Zimmer, M.: *Messung der Multipolverteilung der ELSA-Quadrupol- und Sextupolmagnete*, Universität Bonn 1986, BONN-IR-86-05

# Danksagung

Diese Diplomarbeit stand unter der Leitung von Prof. Dr. D. Husmann, dem ich für seine immer freundliche Unterstützung danken möchte. Ebenfalls großen Dank schulde ich meinen Betreuern Dr. J. Wenzel und Herrn J. Keil. Ihr Wissen und ihr Enthusiasmus hat viel zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Für ihre Unterstützung in technischen Angelegenheiten danke ich Frau S. Zigann, Herrn W. Lindenberg, Herrn H.J. Welt und Herrn B. Rolfsen.

Dr. I. Mohos und Dr. J. Dietrich von COSY ist für ihre Arbeit bei der Entwicklung der neuen Monitor-Elektronik zu danken. Herrn A. Jankowiak von DELTA danke ich für die Kooperation beim Test der Elektronik der DELTA-Strahllagemonitore.

Dank gebührt auch Herrn J. Barth, mit dem ich während meines Studiums viel zusammengearbeitet habe, und Herrn C. Steier für viele interessante Diskussionen.