

Strahldiagnose und Closed-Orbit-Charakterisierung mit HF-Strahllagemonitoren am Beispiel der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA

Andreas Jankowiak

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
des Fachbereichs Physik
der Universität Dortmund

November 1999

Tag der mündlichen Prüfung: 27.01.2000

1. Referent: Prof. Dr. Thomas Weis

2. Referent: Prof. Dr. Eberhard Jaeschke

Vertreterin der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen

und Mitarbeiter: Dr. Renate Wunstorf

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufgaben des Strahllagemeißsystems	4
2.1	Single-Turn- und Closed-Orbit-Messungen	4
2.2	Emittanz von Elektronen-Speicherringen	5
2.3	Messung der relativen Strahllage	8
2.3.1	Orbit-Feedback	9
2.3.2	Maschinen-Studien	11
2.4	Messung der absoluten Strahllage	16
2.4.1	Langzeit-Stabilisierung der Strahllage	16
2.4.2	Closed-Orbit-Korrektur	17
2.5	Einfluß der Genauigkeit der absoluten Strahllagemessung auf die Betriebsparameter der Beschleunigeranlage	18
2.5.1	Zugrundeliegende Parameter	18
2.5.2	Simulation des Einflusses auf DELTA	20
3	Theorie der Strahllagemessung	26
3.1	Methoden der Strahllagemessung	26
3.2	Berechnung der Signalfunktion eines Strahllagemonitors mit Pickup-Elektroden	28
3.2.1	Signalfunktion einer Linienladung	29
3.2.2	Signalfunktion einer gaußförmigen transversalen Ladungs- verteilung	32
3.3	Bestimmung der Strahllage	38
3.4	Einfluß des Strahlquerschnitts auf die Strahllage-Bestimmung . .	42
3.5	Emittanz-Messung mittels Pickup-Strahllagemonitore	48
4	Das DELTA-Strahllagemeißsystem	52
4.1	Strahllagemonitor	52

4.2	Meßelektronik	56
4.3	Kontrollsystem-Anbindung	60
4.4	Leistungsdaten des Strahltagemeßsystems	62
5	Kalibration des Lagemeßsystems	63
5.1	Konventioneller Ansatz	64
5.2	Strahlgestützte Kalibration	70
5.3	Komponenten des Systems zur strahlgestützten Kalibration	76
5.3.1	Situation an DELTA	77
5.3.2	Hardware zur individuellen Variation der Quadrupolstärken	78
5.3.3	Test der Komponenten	82
6	Ergebnisse der Kalibrationsmessungen	84
6.1	Durchführung der Kalibrationsmessungen	84
6.2	Test des Kalibrations-Systems	87
6.2.1	Einfluß des generalisierten Kick-Parameters	87
6.2.2	Einfluß des Closed-Orbits	90
6.3	Reproduzierbarkeit und Meßauflösung	93
6.4	Ergebnisse der Kalibrationsmessungen	97
6.5	Einfluß der Kalibration des Lagemeßsystems auf die Betriebsparameter	102
6.5.1	Emittanz	103
6.5.2	Closed-Orbit und Kickstärken der Korrektur-Magnete	106
6.6	Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Kalibrations-Systems und Ergebnisse	108
6.6.1	Messung der lokalen Betafunktionen	108
6.6.2	Strahlgestütztes Alignment von Quadrupolmagneten	111
7	Zusammenfassung	113
A	Vorschlag für einen Emittanzmonitor mit kapazitiven Pickup-Elektroden	116

Kapitel 1

Einleitung

Die stetig wachsenden Anforderungen der Nutzer moderner Beschleunigeranlagen an die Leistungsfähigkeit der Maschinen stellt eine Herausforderung für die Beschleunigerphysik und -technologie dar. Jede neue Entwicklungsgeneration erfordert eine Erhöhung der für diesen Maschinentyp charakteristischen Parameter, wie zum Beispiel der Energie, des Strahlstroms, der Luminosität oder der Brillanz, um eine oder sogar mehrere Größenordnungen. Die Komponenten dieser Maschinen müssen darüberhinaus immer zuverlässiger, die Maschinensteuerung effizienter und die Strahldiagnose verlässlicher werden.

Am CERN¹ in Genf wird zur Zeit der Aufbau des Beschleunigers LHC (**L**arge **H**adron **C**ollider [1]) geplant und vorbereitet. In dieser für die Kollision von Protonen einer Energie von 7TeV und Strahlströmen von etwa $0,5\text{A}$ vorgesehenen Speicherringanlage zur Untersuchung des Top-Quarks in $t\bar{t}$ -Prozessen mit einer bisher noch nie erreichten Wechselwirkungsrate muß ein Teilchenstrahl mit einer gespeicherten Energie von ca. 300MJ , mehr als hundertmal so hoch wie in derzeitigen Protonenbeschleunigern, gehandhabt werden. Dieser muß im Falle einer Betriebsstörung innerhalb eines Umlaufs von $86\mu\text{s}$ Dauer kontrolliert in einen dafür konzipierten Strahlfänger [2] gelenkt werden. Dazu ist ein zuverlässiges, schnelles und hochauflösendes Strahllage- und Strahlverlustmeßsystem notwendig, daß einen drohenden Strahlverlust frühzeitig detektiert und die kontrollierte Strahlvernichtung auslöst und überwacht. Eine weitere große Herausforderung stellt das TESLA-Projekt (**T**eV **E**nergy **S**uperconducting **L**inear **A**ccelerator [3]), das am DESY² in Hamburg verfolgt wird, dar. Im Rahmen der Vorbereitungsphase dieses Projektes soll an der TESLA-Test-Facility ein FEL (**F**ree-**E**lectron-**L**aser) [4] in Betrieb genommen werden, der auf dem SASE-(**S**elf-**A**mplified **S**pontaneous **E**mission)-Prinzip beruht. In diesem FEL wird ein Elektronenstrahl mit einer Energie von 1GeV und einer Strahlbreite von $50\mu\text{m}$ durch einen 25m langen Undulator mit einer Gaphöhe von 12mm geführt, in dem er mit seiner spontan erzeugten Synchrotronstrahlung wechselwirkt bis stimulierte Emission von

¹Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Europäisches Labor für Teilchenphysik

²Deutsches Elektronen **S**ynchrotron

Photonen im unteren VUV-Bereich³, bei einer Wellenlänge von $6nm$, stattfindet. Um dies zu ermöglichen, ist es notwendig, die Strahlage des Elektronenstrahls für jeden einzelnen Bunchzug mit einer Auflösung von weniger als $5\mu m$ bei einer Wiederholrate von $10Hz$ zu messen [5] und zu korrigieren.

Ein weiterer Bereich, der stetig wachsenden Anforderungen seitens der Nutzer unterliegt, sind die sogenannten Synchrotronstrahlungsquellen. Bei diesen handelt es sich um Elektronen-Speicherringe, die dediziert zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung⁴ geplant und gebaut wurden. Waren die Quellen der 2. Generation noch ehemals für die Hochenergiephysik gebaute Beschleuniger, die für den Einsatz als Synchrotronstrahlungsquelle modifiziert wurden und lediglich Emittanzen im Bereich von $\mu m rad$ aufwiesen, so sind die neuen in Betrieb oder im Aufbau befindlichen Quellen der 3. Generation für Emittanzen im Bereich $nm rad$ ausgelegt und liefern somit eine um mehrere Größenordnungen erhöhte Brillanz der Synchrotronstrahlung. Diese kleinen Emittanzen, mit den damit verbundenen kleinen Strahldimensionen in der Größenordnung von einigen $10\mu m$, stellen hohe Anforderungen an die Strahldiagnose und insbesondere an das Strahlagemeß- und Strahlagekorrektur-System. Um den Anwendern eine maximale Nutzung dieser kleinen Emittanzen zu ermöglichen, muß der Elektronenstrahl mit einer Auflösung von μm über die Dauer einer Meßzeit, typischerweise einige $10h$, stabilisiert und mit hoher Präzision in bezug auf die Magnetstruktur geführt werden.

In dieser Arbeit soll am Beispiel der Speicherringanlage DELTA⁵ der Einfluß des Strahlagemeßsystems und insbesondere der Einfluß der Kalibration dieses Systems auf die erreichbaren Betriebsparameter untersucht werden. DELTA ist vom Layout her keine typische Synchrotronstrahlungsquelle, sondern bietet mit ihrer Racetrack-Form zwei lange Geraden für den Einbau besonderer Synchrotronstrahlungserzeuger. Aufgrund der erreichbaren Betriebsparameter kann DELTA gleichwohl zu den Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation gezählt werden.

In Kapitel 2 dieser Arbeit wird eine Einführung in die unterschiedlichen Aufgaben eines Strahlagemeßsystems gegeben. Es wird der Einfluß der Genauigkeit der absoluten Strahlagemessung und damit der Kalibration des Systems auf die Leistungsfähigkeit von DELTA mittels Simulationen untersucht und daraus Anforderungen an die Genauigkeit der Kalibrationsmessungen abgeleitet. Es schließt sich ein Kapitel an, in dem auf die Theorie der Strahlagemessung eingegangen wird. Insbesondere werden für Strahlagemonitore mit kapazitiven Pickup-Elektroden die Signalfunktionen für Teilchenstrahlen mit gaußförmiger transversaler Ladungsverteilung bestimmt. Davon ausgehend wird gezeigt, wie die Strahlagebestimmung unter Berücksichtigung der Nichtlinearitäten der Signalfunktionen des Strahlagemonitors durchgeführt wird und welchen Einfluß die Strahlbreite auf die Genauigkeit der Lagemessung hat. Abschließend wird auf die Möglich-

³Vakuum-Ultra-Violett, Wellenlängenbereich zwischen $200nm - 3nm$.

⁴Synchrotronstrahlung ist die von geladenen Teilchen tangential zu einer radial beschleunigten Bewegung emittierte elektromagnetische Strahlung.

⁵Dortmunder **EL**ektronen **T**estspeicherring **A**nlage, die $1,5GeV$ Synchrotronstrahlungsquelle des Fachbereichs Physik der Universität Dortmund.

keit eingegangen, Emittanzmessungen mittels Pickup-Strahllagemonitoren durchzuführen. In Anhang A dieser Arbeit wird ein Konzept für ein solches Emittanzmeßsystem vorgestellt.

In Kapitel 4 werden die Komponenten und die Leistungsdaten des DELTA-Strahllagemeßsystems beschrieben, bevor im folgenden Kapitel auf die Kalibration des Systems eingegangen wird. Dabei wird der Unterschied zwischen der konventionellen Vorgehensweise und der für DELTA entwickelten strahlgestützten Methode herausgearbeitet und dargelegt, daß nur mit strahlgestützten Kalibrationssystemen die erforderliche Genauigkeit in der absoluten Strahllagemessung erreicht werden kann. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der durchgeführten Kalibrationsmessungen und die erreichten Verbesserungen der Betriebsparameter von DELTA vorgestellt. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit den Ergebnissen weiterer Messungen, die durch das zur strahlgestützten Kalibration aufgebaute System ermöglicht wurden. Dabei werden die Messungen der lokalen Betafunktionen beschrieben, sowie auf Alignment-Messungen an neu eingebauten Quadrupol-Magneten eingegangen.

Kapitel 7 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse ab.

Kapitel 2

Aufgaben des Strahllagemeißsystems

Die Aufgaben eines Strahllagemeißsystems sind so vielfältig wie die verschiedenen Realisierungen eines solchen Systems an den unterschiedlichen Beschleunigeranlagen. Eine sehr allgemeine Definition des Begriffs Strahllagemessung lautet: „Bestimmung der transversalen Position eines Teilchenstrahls innerhalb der Vakuumkammer des Beschleunigers“, wobei so unscharfe Begriffe wie Position, Teilchenstrahl und Beschleuniger benutzt werden. Im weiteren wird daher eine genauere Begriffsbestimmung gegeben, die definiert, was unter Strahllagemessung zu verstehen ist.

2.1 Single-Turn- und Closed-Orbit-Messungen

Wie in der Einführung vorgestellt, werden in dieser Arbeit Synchrotronstrahlungsquellen (im weiteren SR¹-Quellen genannt), d.h. Elektronen-Speicherringe, behandelt. In diesen werden die Elektronen, durch das Hochfrequenzsystem zu Bunchen paketiert, in einem ringförmigen Vakuumsystem, geführt durch Dipol-, Quadrupol- und Sextupolmagnete, mit einer Energie von in der Regel mehr als 500MeV gespeichert. Die sich einstellende transversale Ladungsverteilung des Elektronenstrahls läßt sich, ebenso wie die longitudinale der einzelnen Bunche, durch eine Gaußverteilung beschreiben.

Unter Strahllagemessung wird daher die Bestimmung der transversalen Position des Ladungsschwerpunktes des Elektronenstrahls verstanden, wobei diese an dafür vorgesehenen Strahllagemonitoren², die in geeigneter Weise entlang der Umlaufbahn des Elektronenstrahls plaziert sind, gemessen wird. Die Zahl dieser BPMs liegt abhängig vom Umfang des Beschleunigers und der Magnetstruktur zwischen 10 bis zu einigen 100.

¹Synchrotron-Radiation

²Im weiteren auch BPM (**B**eam **P**osition **M**onitor) genannt.

Weiter kann zwischen Single-Turn- und Closed-Orbit-Messungen unterschieden werden, wobei der Übergang als fließend betrachtet werden muß. Unter Single-Turn-Messungen versteht man die Bestimmung der Strahllage innerhalb eines Umlaufes, was bei Umlauffrequenzen im Bereich von einigen 100kHz bis MHz und Bunchabständen von einigen ns hohe Anforderungen an die Meßwertfassung und -verarbeitung stellt. Dabei ist die Genauigkeit der Einzelmessung eher gering und liegt in der Größenordnung von einigen $10 - 100\mu\text{m}$, kann aber in vielen Systemen durch Mittelwertbildung über viele Umläufe auf wenige μm verbessert werden [6]. Ein solches System erlaubt die Untersuchung dynamischer Vorgänge, wie z.B. die Vermessung des transversalen Phasenraumes und ist ein wertvolles Hilfsmittel bei der Inbetriebnahme einer Beschleunigeranlage, da es die Korrektur der Teilchenbahn auf den ersten Umläufen bis zum Erreichen eines gespeicherten Strahls ermöglicht. Durch die Fähigkeit zur Mittelwertbildung über viele Umläufe ist der Übergang zur Closed-Orbit-Messung möglich.

Als Closed-Orbit-Messung bezeichnet man die Bestimmung der Position des gespeicherten Teilchenstrahls nach dem Abklingen aller dynamischer Vorgänge. Die Integrationszeit des Systems liegt dabei oft in der Größenordnung einiger s , um eine Auflösung im μm -Bereich zu erzielen. Aktuell in Betrieb genommene Systeme erreichen allerdings bereits μm -Auflösungen bei Bandbreiten im Bereich von 1kHz [7].

Es muß noch unterschieden werden zwischen der relativen Auflösung und der absoluten Genauigkeit der Strahllagemessung und der unterschiedlichen Bedeutung für den Betrieb eines Beschleunigers. Bevor jedoch darauf weiter eingegangen wird, soll der für das weitere Verständnis der Arbeit wichtige Begriff der Emittanz näher erläutert werden.

2.2 Emittanz von Elektronen-Speicherringen

Zur Beschreibung des Teilchenstrahls in Beschleunigern wird ein Koordinatensystem (x, y, s) benutzt, dessen Koordinatenursprung sich synchron mit einem Teilchen der Sollenergie auf der Sollumlaufbahn mitbewegt. Die x -Koordinate zeigt dabei radial zur Bewegung nach außen, die y -Koordinate senkrecht zur Bewegungsebene nach oben. Ein dem Referenzteilchen vorausseilendes Teilchen hat eine positive s -Koordinate.

In diesen Koordinaten läßt sich die Bewegung eines Teilchens in linearer Näherung durch die folgenden Differentialgleichungen beschreiben [8]:

$$\begin{aligned} x''(s) + K_x(s) \cdot x(s) &= \frac{1}{R(s)} \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \\ y''(s) + K_y(s) \cdot y(s) &= 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Dabei gilt $x''(s) = \frac{d^2x(s)}{ds^2}$, $\Delta p/p_0$ ist die relative Impulsabweichung des Teilchens von der Sollenergie p_0 und die Funktionen $K_x(s)$ und $K_y(s)$ sind wie folgt definiert:

$$K_x(s) = \frac{1}{R(s)^2} - k(s) \quad \text{und} \quad K_y(s) = k(s)$$

In einem Kreisbeschleuniger sind diese Funktionen periodisch in s , d.h. es gilt $K_{x,y}(s) = K_{x,y}(s + L)$, wenn L der Umfang des Beschleunigers ist. Dabei ist $R(s)$ der lokale Biegeradius, bestimmt durch die Dipolmagnete, und $k(s)$ die Fokussierstärke der eingesetzten Quadrupol-Magnete. Man erkennt weiterhin, daß beide Bewegungsrichtungen unabhängig voneinander, d.h. entkoppelt, betrachtet werden können, wenn nur Dipol- und Quadrupolmagnete, die im wesentlichen die Optik des Beschleunigers bestimmen, berücksichtigt werden.

Die Lösung der Differentialgleichung 2.1, läßt sich folgendermaßen schreiben (dabei steht u sowohl für x als auch y):

$$u(s) = \sqrt{\varepsilon_u} \cdot \sqrt{\beta_u(s)} \cdot \cos(\phi_u(s) - \phi_0) + D_u(s) \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \quad (2.2)$$

mit

$$\begin{aligned} \beta_u(s) &= \text{Betafunktion} \\ \varepsilon_u &= \text{Emittanz} \\ \phi_u(s) &= \int_0^s \frac{ds'}{\beta_u(s')} = \text{Betatronphase} \\ D_u(s) &= \text{Dispersionsfunktion} \end{aligned}$$

$\phi_u(s)$ gibt den Phasenvorschub der Betatronschiwingung an. Die Anzahl dieser Schwingungen pro Umlauf wird Q-Wert genannt:

$$Q_u = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^L \frac{1}{\beta_u(s)} ds \quad (2.3)$$

Durch die Betafunktion $\beta_u(s)$ zusammen mit der Emittanz ε_u wird die Einhüllende der Teilchenbewegung beschrieben. Diese ist, ebenso wie die Dispersionsfunktion, vollständig durch die Magnetstruktur bestimmt. Die Dispersionsfunktion $D_u(s)$ ist eine spezielle Lösung der Differentialgleichung 2.1 für $\Delta p/p_0 = 1$. Aus ihr läßt sich die Ablage eines Teilchens mit dem Impuls $p_0 + \Delta p$ berechnen. Sowohl die Betafunktion als auch die Dispersion sind periodische Funktionen in s , d.h. auch für diese gilt $\beta_u(s) = \beta_u(s + L)$ und $D_u(s) = D_u(s + L)$.

Für die Dispersionsfunktion der vertikalen Bewegungsrichtung gilt im allgemeinen $D_y(s) = 0$, da die Ablenkung des Elektronenstrahls in der idealen Maschine nur in der horizontalen Ebene stattfindet.

Die Größe ε_u ist die sogenannte Einzelteilchenemittanz und repräsentiert, multipliziert mit π , die Fläche der Phasenraumellipse der Teilchenbewegung im (u, u') -Raum. Diese ist gemäß des Liouvilleschen Theorems eine Konstante der Bewegung. In einem Beschleuniger befindet sich ein Ensemble von Teilchen, das durch eine gaußförmige transversale Ladungsverteilung beschrieben wird und dem man gemäß folgender Beziehung

$$\varepsilon_u = \frac{\sigma_u^2(s)}{\beta_u(s)} \quad (2.4)$$

eine Gesamtemittanz zuweist. σ_u ist dabei die Standardabweichung der Gaußverteilung in der jeweiligen Schwingungsebene x oder y .

Abschließend ist zu erklären, wie die lediglich als Integrationskonstante eingeführte Emittanz, für einen Teilchenbeschleuniger bestimmt ist.

Bei schweren Teilchen, d.h. Protonen und Ionen, die keinen Strahlungseffekten³ unterliegen, ist die Emittanz durch die Anfangsbedingungen bestimmt, d.h. durch die Verteilung der in den Beschleuniger injizierten Teilchen im Phasenraum und somit von außen vorgegeben und daher keine intrinsische Eigenschaft der Beschleunigeroptik. Elektronen strahlen jedoch bei ihrer Ablenkung in Magnetfeldern Synchrotronstrahlung ab, was zu einer Reduktion der transversalen und longitudinalen Impulskomponenten führt. Durch die Energiezufuhr im Cavity wird die longitudinale Impulskomponente restauriert. Dies führt in Summe zu einer Dämpfung der transversalen Schwingungsamplitude und damit zu einer Reduktion der Strahlemittanz, die nach einigen Dämpfungszeiten zu Null würde.

Dem steht folgender Anregungsmechanismus gegenüber: Durch die quantenhafte Emission eines Photons der Synchrotronstrahlung ändert das Elektron seine Energie und begibt sich, wenn die Emission an einer Position mit Dispersion stattfindet, auf eine Dispersionsbahn und beginnt Betatronoszillationen, die zu einer Vergrößerung des Phasenraumvolumens führen.

Die horizontale Emittanz ε_x ist somit für Elektronen durch das Gleichgewicht von Anregung und Dämpfung im Kollektiv des Elektronenstrahls bestimmt und läßt sich gemäß folgender Beziehung berechnen [9]:

$$\varepsilon_x = C_q \gamma^2 \frac{\left\langle \frac{H(s)}{R(s)^3} \right\rangle}{J_x \cdot \left\langle \frac{1}{R(s)^2} \right\rangle} \quad (2.5)$$

mit

³Die Synchrotronstrahlungsleistung ist proportional zum Inversen der Ruhemasse des Teilchens zur vierten Potenz. Daher sind Strahlungseffekte bei schweren Teilchen erst bei sehr hohen Teilchenenergien, wie sie z.B. im LHC erreicht würden, von Bedeutung.

$$\begin{aligned}
C_q &= 3,84 \cdot 10^{-13} m \\
\gamma &= \text{relativistischer Faktor} \\
J_x &= \text{horizontale Dämpfungskonstante} \\
H(s) &= \frac{1}{\beta_x(s)} \cdot \left[D_x(s)^2 + \left(\beta_x(s) \cdot D'_x(s) - \frac{\beta'_x(s)}{2} \cdot D_x(s) \right)^2 \right] \quad (2.6)
\end{aligned}$$

$\langle \rangle$ bedeutet dabei die Mittelung über den Beschleunigerumfang. Für die horizontale Dämpfungskonstante gilt für Maschinen mit getrennten Ablenk- und Fokussiermagneten, d.h. starker Fokussierung, in guter Näherung $J_x \approx 1$.

Man erkennt, daß die Gleichgewichtsemittanz im wesentlichen durch die Magnetstruktur bestimmt ist. Dies eröffnet die Möglichkeit, beim Design einer SR-Quelle gezielt die Emittanz der Maschine ihrer Aufgabe entsprechend einzustellen. Betrachtet man Gleichung 2.5 und 2.6, so erkennt man, daß zum Erreichen von kleinen Emittanzen bei gegebener Energie große Biegeradien der Dipolmagnete bei gleichzeitig kleiner Dispersion und Betafunktion erforderlich sind.

Wie bereits festgestellt, findet in der Regel in der vertikalen Ebene des Beschleunigers keine Ablenkung statt, d.h. es gilt $R_y(s) = \infty$, und auch die Dispersion $D_y(s)$ verschwindet. Daher sollte die vertikale Emittanz beliebig klein sein.⁴ Aufgrund von unvermeidlicher Ablenkung des Strahls auch in der vertikalen Ebene, einer nicht verschwindenden Dispersionsfunktion $D_y(s)$ und einer Kopplung der Bewegungsebenen durch z.B. gedrehte Magnete (genauer wird hierauf in Abschnitt 2.5 eingegangen), entsteht eine endliche vertikale Emittanz. Da diese durch geeignete Magnetanordnungen, z.B. gedrehte Quadrupole (sogenannte Skew-Quadrupole), in weiten Bereichen einstellbar ist, gibt man die vertikale Emittanz oft in Einheiten der horizontalen Emittanz an:

$$k = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (2.7)$$

Der Quotient k ist nicht mit dem Kopplungsfaktor κ zu verwechseln, der in Abschnitt 2.5.1 definiert wird, dennoch bezeichnet man k oft als Kopplung.

2.3 Messung der relativen Strahllage

Die relative Auflösung der Strahllagemessung bestimmt die Genauigkeit mit der Strahlbewegungen, d.h. Verschiebungen des Ladungsschwerpunktes des gespeicherten Strahls, detektiert werden können. Ein Großteil der möglichen Untersuchungen, die mit dem Strahllagemesssystem durchgeführt werden können, aber

⁴Aufgrund des endlichen Öffnungswinkels der Synchrotronstrahlung kommt es durch die Emission von Photonen auch in der vertikalen Ebene zu Winkelkicks und damit zu vertikalen Strahlbewegungen. Diese führen allerdings zu einer vertikalen Emittanz die im Bereich von $0,1 \text{ pm rad}$ liegt und damit zu vernachlässigen ist.

auch die Leistungsfähigkeit des Beschleunigers hängen, wie im folgenden gezeigt wird, von der relativen Auflösung des Systems ab.

2.3.1 Orbit-Feedback

Für die Nutzer der Synchrotronstrahlung ist einer der wichtigsten Parameter des Beschleunigers - genauer der Beamline, an der die Experimente durchgeführt werden - die Brillanz. Diese ist eine spektrale Größe und gibt den Photonenfluß pro Sekunde in 0,1% Energiebreite pro Querschnittsfläche des Quellpunktes und Raumwinkelelementes normiert auf 1A Strahlstrom an. Je größer die Brillanz, desto mehr Photonen pro Energieintervall erreichen den Meßplatz, was wiederum zu kürzeren Meßzeiten führt und so bestimmte Untersuchungen mit geringer Ereignisrate überhaupt erst ermöglicht. Als Beispiel sei hier die Kristallographie an Proteinen genannt, da die zu untersuchenden Proben sehr klein sind und nicht sehr lange untersucht werden können. Erst die Brillanz moderner Synchrotronstrahlungsquellen mit ihren speziellen Insertion-Devices⁵ (im weiteren ID abgekürzt) hat diese Untersuchungen ermöglicht.

Die Brillanz läßt sich wie folgt ausdrücken:

$$B = \frac{F}{4\pi^2 \cdot \varepsilon_x \cdot \varepsilon_y} \quad \text{in} \quad \left[\frac{\text{Photonen}}{s \cdot 0,1\% \text{ BW } mm^2 \text{ mrad}^2 \text{ A}} \right] \quad (2.8)$$

F ist dabei der Photonenfluß. Man erkennt, daß die Brillanz direkt von der Strahlemittanz abhängt, und eine große Brillanz, neben einem hohen Strahlstrom, möglichst kleine Emittanzen erfordert.

In Gleichung 2.4 wird die Emittanz über die Standardabweichung der Gaußverteilung der transversalen Ladungsdichte definiert. Da in vielen Experimenten bei der Messung über die Zeit integriert wird, führt jede Bewegung des Ladungsschwerpunktes, die schneller als diese Integrationszeit erfolgt, zu einer virtuellen Vergrößerung des Strahlquerschnitts und vergrößert die effektive Emittanz. Dies führt zu einer Reduktion der Brillanz. Weiterhin gibt es hochauflösende Experimente, in denen die Quellgröße des Elektronenstrahls direkt die erreichbare Energieauflösung der Beamline bestimmt [10] und die somit ebenfalls sehr sensitiv für Strahlbewegungen sind.

Andererseits sind moderne Synchrotronstrahlungsquellen mit ihrer stark fokussierenden Optik zur Erzielung von Emittanzen im $nm \text{ rad}$ Bereich sehr empfindlich gegen Vibrationen der Magnete und Netzgeräteschwankungen. Magnetvibrationen werden oft durch Mikroseismik, z.B. durch Kühlwasserpumpen, erzeugt. Das Frequenzspektrum liegt im Bereich von mHz bis $100Hz$, wobei es aufgrund von Eigenschwingungen der Magnetunterstützung zu Resonanz-Überhöhungen kommen kann. Der Verstärkungsfaktor, der angibt, um welchen Faktor sich eine Verschiebung eines Quadrupolmagneten als Orbitstörung auswirkt, liegt typischerweise bei 10 - 30.

⁵Unter Insertion-Device versteht man alle speziell zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung eingebauten Strahlungszeuger, wie zum Beispiel Undulator- oder Wigglermagnete.

Eine der wichtigsten Aufgaben des Lagemeßsystems ist daher die Bereitstellung der Meßdaten zur Lagestabilisierung des Elektronenstrahls, welche als lokales oder globales Orbit-Feedback realisiert werden kann.

Unter lokalem Feedback versteht man dabei die Stabilisierung des Quellpunktes der Synchrotronstrahlung innerhalb eines IDs mittels 4er-Beulen, die durch Korrekturmagnete vor und hinter dem Quellpunkt erzeugt und durch die Verarbeitung von Lagesignalen von 2 BPMs gesteuert werden. Da es mit 4 Korrekturmagneten möglich ist, Lage und Winkel des Elektronenstrahls in einer Ebene an einem Punkt unabhängig voneinander einzustellen, ohne den Rest des Speicherringes außerhalb der Beule zu beeinflussen, ist das lokale Feedback sehr effektiv. Aufgrund der wenigen beteiligten Elemente ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit solcher Systeme hoch und erlaubt Korrekturen bis zu Frequenzen von mehreren kHz .

Da moderne SR-Quellen eine große Zahl von IDs aufweisen, in denen die Quellpunkte stabilisiert werden müssen, stößt das lokale Feedback hier auf seine Grenzen. Da die 4er-Beulen meist nicht völlig abgeschlossen sind, kommt es bei aktivem lokalem Feedback zu einer Orbitstörung auf dem ganzen Ring. Bei mehreren aktiven lokalen Orbit-Feedbacks kann es daher zu Rückkopplungseffekten kommen, die die Effizienz des Systems reduzieren.

Daher bietet sich die Verwendung von globalem Orbit-Feedback an. Diese Methode erlaubt es, den Orbit an allen Quellpunkten gleichzeitig zu stabilisieren. Eine Methode dazu ist die Verwendung der Beam-Response-Matrix M_{BR} .

Es sei \vec{X}_{QP} der Vektor aller Soll-Positionen der Strahlage (x und y), der die korrekte Lage aller Quellpunkte der Insertion-Devices garantiert, sowie \vec{X}_M die aktuell gemessene Strahlage. Weiter sei M_{BR} definiert als die Matrix, die den Vektor aller Korrektorstärkenänderungen $\Delta \vec{\theta}$ mit dem Vektor der resultierenden Strahlageänderungen $\Delta \vec{x}$ verknüpft. Diese kann leicht gemessen oder mittels Simulationsprogrammen für die Beschleunigeroptik berechnet werden. Die Orbitkorrektur wird nun durchgeführt, indem die folgende Vektorgleichung

$$\left(\vec{X}_{QP} - \vec{X}_M \right) - M_{BR} \cdot \Delta \vec{\theta} = 0 \quad (2.9)$$

gelöst und der Korrektur-Vektor $\Delta \vec{\theta}$ bestimmt wird. Da die Zahl der Korrekturmagnete und der BPMs oft verschieden ist bzw. die Anzahl der berücksichtigenden Elemente von dem Ziel der Orbitkorrektur abhängt, ist die Matrix M_{BR} nicht notwendig quadratisch. Es existiert daher nicht immer eine exakte Lösung für $\Delta \vec{\theta}$. Oder aber eine exakte Lösung ist nicht bestimmbar, da das Gleichungssystem singular ist. Oft sollen auch Nebenbedingungen erfüllt werden, wie z.B. ein fixierter Orbit an anderer Stelle oder ein möglichst kleiner Mittelwert der berechneten Korrektorstärken. In diesen Fällen wird oft die Methode der Singular-Value-Decomposition (kurz SVD [11] [12]) eingesetzt.

Der Nachteil des globalen Orbit-Feedbacks ist der höhere Rechenaufwand, bedingt durch die größere Zahl an beteiligten BPMs und Korrekturmagneten, sowie der Aufwand für den Datentransfer, da die Komponenten um den ganzen

Ring verteilt sind. Trotzdem werden mittlerweile globale Orbit-Feedback-Systeme mit Bandbreiten bis zu $1kHz$ betrieben [13].

Abschließend sollen die Anforderungen an die relative Auflösung des Strahllagemesssystems definiert werden. Um die Vorteile, die 3. Generation SR-Quellen aufgrund ihrer extrem kleinen Emittanzen bieten, optimal nutzen zu können, muß die Strahllage sinnvollerweise auf kleiner $1/10$ der Strahlbreite, definiert als eine Standardabweichung der transversalen Ladungsverteilung, stabilisiert werden [14] [15].

Die transversalen Strahldimensionen lassen sich mit Hilfe der Gleichung 2.4, unter Berücksichtigung der mittleren Energiebreite $\Delta p/p_0$ des Strahls und der Dispersion, wie folgt berechnen:

$$\sigma_x(s) = \sqrt{\varepsilon_x \cdot \beta_x(s) + \left(D(s) \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \right)^2} \quad (2.10)$$

$$\sigma_y(s) = \sqrt{\varepsilon_y \cdot \beta_y(s)} \underbrace{\quad}_{\text{Gl. 2.7}} \sqrt{k \cdot \varepsilon_x \cdot \beta_y(s)}$$

In Abbildung 2.1 sind für die DELTA006-Optik [23] die Werte von $\sigma_x/10$ und $\sigma_y/10$ für die gesamte Anlage aufgetragen.

Man erkennt deutlich, daß die höchsten Anforderungen an die Lagemessung in der vertikalen Ebene gestellt werden müssen. Die erforderliche Auflösung liegt in der horizontalen Ebene bei kleiner $25\mu m$, was leicht zu erreichen ist, in der vertikalen Ebene muß dagegen eine Auflösung kleiner $5\mu m$ erreicht werden. Wenn man nun noch bedenkt, daß in manchen Maschinen auch Kopplungen von $k = 0,1\%$ bei horizontalen Emittanzen von $5nm\ rad$ erreicht werden, so ist für diese eine Auflösung von kleiner $1\mu m$ erforderlich [16] [17].

2.3.2 Maschinen-Studien

Eine Vielzahl von Messungen zur Charakterisierung einer Beschleunigeranlage, die mittels des Strahllagemesssystems durchgeführt werden können, hängen von der relativen Genauigkeit des Meßsystems ab. Dies soll nun beispielhaft gezeigt werden.

Messung der Dispersion

Die Dispersion ist eine wichtige die Eigenschaften einer Beschleunigeranlage beeinflussende Größe. Oft ist es von Bedeutung, z.B. im Bereich eines starken Wigglermagneten, daß die Dispersion definierte Werte, in diesem Beispiel Null, annimmt, um eine Emittanzvergrößerung durch Strahlungsanregung zu vermeiden.

Da die Dispersion definiert ist als Ablage eines Strahlteilchens mit einer Impulsabweichung gegenüber dem Sollteilchen, läßt sich diese mit dem Orbitmeß-

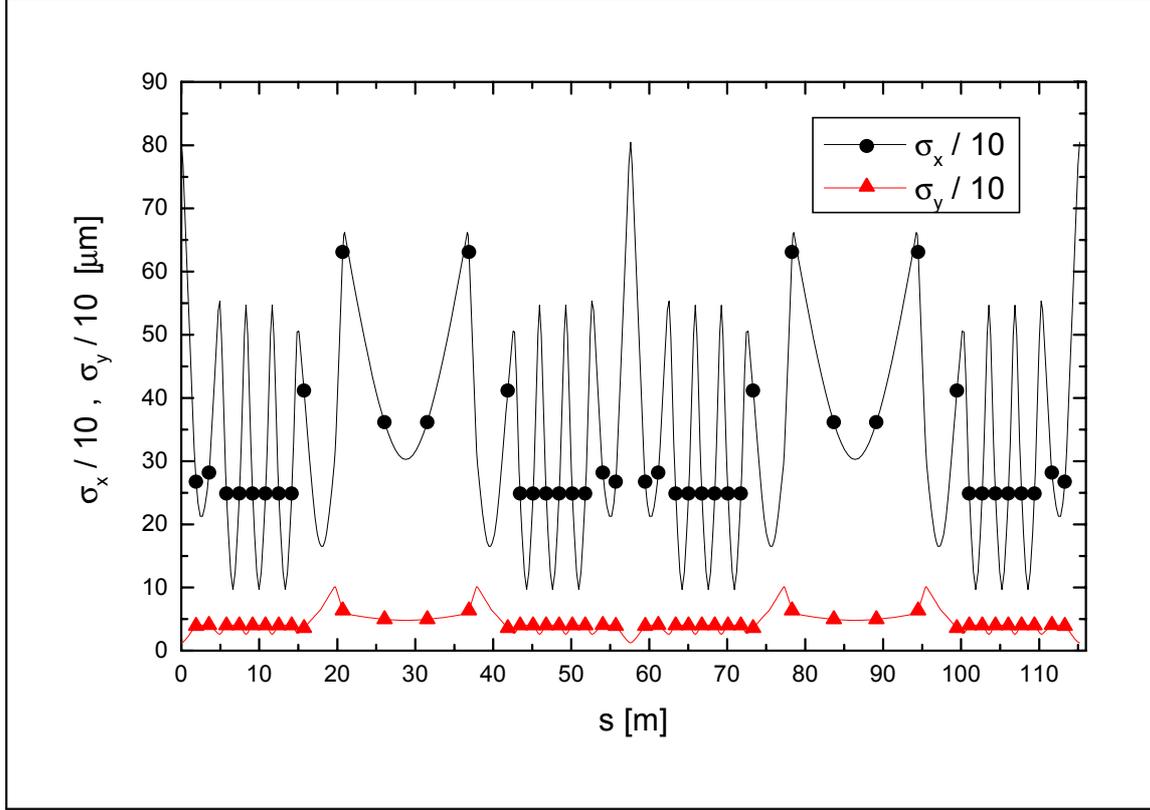


Abbildung 2.1: Aufgetragen sind die Werte für $\sigma_x/10$ und $\sigma_y/10$ gegen den Umfang der Speicherringanlage DELTA (Parameter: $E = 1,5\text{GeV}$, $\varepsilon_x = 21,9\text{nm rad}$, $\Delta p/p = 0,069\%$, $k = 1\%$, DELTA006-Optik). Die Positionen, an denen BPMs vorhanden sind, sind mit Punkten ($\sigma_x/10$) und Dreiecken ($\sigma_y/10$) hervorgehoben.

system bestimmen. Für die Orbitverschiebung $\Delta x(s)$ eines Elektrons, dessen Impuls um Δp verändert wird, gilt:

$$\Delta x(s) = D_x(s) \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \quad (2.11)$$

Die Dispersion läßt sich daher als die Differenz Δx zweier Orbits für verschiedene Impulse, bzw. Energien (für relativistische Elektronen gilt in guter Näherung $\Delta p \cdot c \simeq \Delta E$) bestimmen. Durch Änderung der Frequenz f_0 der Beschleunigungsstruktur um Δf , was sehr präzise möglich ist, wird der Elektronenstrahl auf eine Umlaufbahn mit einem anderen Umfang gezwungen; dies führt zu einer Änderung der Energie des Teilchenstrahls. Die Dispersion läßt sich daher wie folgt berechnen:

$$D_x(s) = -\Delta x(s) \cdot \frac{\alpha_c}{\Delta f/f_0} \quad \text{mit} \quad \alpha_c = -\frac{\Delta f/f_0}{\Delta p/p_0} \quad (2.12)$$

α_c ist der Momentum Compaction Factor [8], der sich sehr genau für die theoretische Optik berechnen läßt. Da Frequenzen mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-9} gemessen werden können, ist die Genauigkeit der Dispersionsmessung allein durch die relative Auflösung des Strahllagemeßsystems bestimmt.

Beschleunigermodellierung mittels der Beam-Response-Matrix

Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 eingeführt, verknüpft die Beam-Response-Matrix M_{BR} den Vektor aller Korrektorstärke-Änderungen mit dem der resultierenden Orbitverschiebungen:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta y_n \end{pmatrix} = M_{BR} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \theta_{x,1} \\ \vdots \\ \Delta \theta_{x,p} \\ \Delta \theta_{y,1} \\ \vdots \\ \Delta \theta_{y,q} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Dabei ist n die Zahl aller BPMs, p die Anzahl aller horizontalen und q die Anzahl aller vertikalen Korrekturmagnete. Da an jedem BPM sowohl in x - als auch in y -Richtung gemessen wird, hat die Beam Response Matrix $2n \cdot (p + q)$ Elemente. An DELTA sind dies $2 \cdot 43 \cdot (28 + 24) = 4472$ Elemente. Die Messung von M_{BR} ist in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt.

Durch Veränderung der Kickstärke des 23. horizontalen Korrekturmagneten stellt sich entlang des Speicherrings eine Orbitstörung ein, welche an allen BPMs (im Bild BPM32) gemessen werden kann. Diese ist bestimmt durch die Veränderung $\Delta \theta_{x,23}$ der Stärke des Korrekturmagneten und durch die Magnetstruktur des gesamten Beschleunigers. Der Strahl dient somit als Probe zur Abtastung der Beschleunigeroptik und in der Messung der Orbitstörung an allen BPMs ist implizit die Information über die Magnetstruktur mit all ihren Abweichungen von der theoretisch vorgegebenen enthalten. Durch Wiederholung dieser Messung an allen verfügbaren Korrekturmagneten erhält man die Elemente der Beam-Response-Matrix, aus denen sich die Parameter der *realen* Magnetstruktur bestimmen lassen.

Die Vorgehensweise ist dabei die folgende:

1. Es wird die Beam-Response-Matrix $M_{BR,M}$, wie oben beschrieben, gemessen.
2. Dann wird die Beam-Response-Matrix $M_{BR,T}$ mittels eines Simulationsprogramms, z.B. MAD [18], theoretisch bestimmt. In dem verwendeten Simulationsmodell müssen alle Parameter, die bestimmt werden sollen, enthalten sein. Dies können sein: die k -Werte der Quadrupolmagnete, die transversalen und longitudinalen Aufstellfehler sowie die Winkelfehler der Quadru-

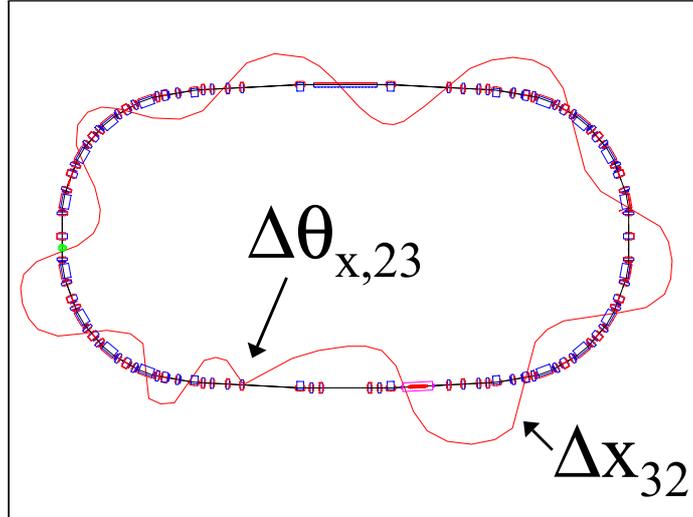


Abbildung 2.2: Schematische Abbildung zur Messung der Beam-Response-Matrix. Der Winkelkick $\Delta\theta_{x,23}$ an einem Korrekturmagnet führt zu einer Closed-Orbit-Störung, die an allen BPMs gemessen werden kann.

pole in allen drei Achsen (x, y, s), die Stärke der Sextupole, die individuelle Energieverschiebung⁶, die jeder Korrekturmagnet dem Strahl aufprägt, transversale Aufstellfehler der BPMs, usf. Betrachtet man nur die Quadrupole und die BPMs gibt es an DELTA, wo 74 Quadrupole eingesetzt werden, $(2 \cdot 43)_{BPM-Fehler} + (74 \cdot 7)_{Quadrupol-Fehler} = 604$ zu bestimmende Parameter.

3. Als Zielfunktion der Anpassung wird folgende Funktion definiert:

$$\chi^2 = \sum_i^{2n} \sum_j^{p+q} \frac{(M_{BR,M}^{i,j} - M_{BR,T}^{i,j})^2}{\sigma_i^2} \quad (2.14)$$

σ_i ist der mittlere Meßfehler des Monitors mit der Nummer i . Durch den Faktor $1/\sigma_i^2$ wird die Messung an einem Monitor mit hoher Auflösung stärker gewichtet, als die eines Monitors mit geringerer Auflösung. Durch Variation der Parameter des Beschleunigermodells und Wiederholung von Schritt 2 und 3, wird versucht, die Funktion χ^2 zu minimieren. Dies kann z.B. mittels eines Gradientenabstiegsverfahren erreicht werden.

4. Wenn χ^2 sein Minimum erreicht hat und gegen einen festen Wert konvergiert, wird die Iteration abgebrochen und die Parameter des Modells werden ausgelesen.

⁶Da jeder Korrektor als Dipol wirkt, bewirkt er eine Veränderung von $\int_0^L B ds$ des Ringes, und damit eine Energieverschiebung.

Dieses Verfahren [19] [20] hat sich als sehr geeignet zur Bestimmung der Parameter eines *realen* Beschleunigers erwiesen. Mittels der so berechneten Maschinen-Parameter läßt sich ein Modell des Beschleunigers erstellen. Oft ist es möglich, Aufstellfehler von Magneten als Ergebnis dieses Modellierungsprozesses zu korrigieren. Das Verfahren ist allerdings sehr zeitintensiv in der Berechnung und daher für Echtzeit-Anwendungen und der Analyse des Beschleunigers während des Maschinenbetriebes nicht geeignet.

Da dieses Verfahren numerisch sehr aufwendig ist, hängt die Qualität der Ergebnisse stark von der relativen Auflösung des BPM-Systems ab. Je besser diese ist, desto stabiler ist der Algorithmus und desto kleiner werden die Fehlergrenzen der bestimmten Parameter. Wenn die linearen Maschinen-Parameter bestimmt werden sollen, ist insbesondere eine besonders hohe relative Auflösung erforderlich, da in diesem Fall die Orbitablagen möglichst klein sein müssen, um den Teilchenstrahl nah bei den Magnetachsen und damit im Bereich der linearen Felder der Magnete zu halten.

Bestimmung der transversalen Vakuumkammer-Impedanz

Die transversale Impedanz der Vakuumkammer einer Beschleunigeranlage ist ein Maß für die Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit seinen auf ihn zurückwirkenden elektro-magnetischen Feldern. An jeder Querschnittsänderung der Kammer, z.B. im Cavity, an den Kickermagneten oder sonstigen Einbauten, entsteht ein Beitrag zur Gesamt-Impedanz. Je glatter die Kammer ist (kleine Zahl von Querschnittsveränderungen) desto kleiner ist die integrierte Impedanz. Die Wirkung der transversalen Impedanz auf den Elektronenstrahl kann als strahlstrom-abhängiger Quadrupol beschrieben werden [21].

Zur Bestimmung der lokalen, transversalen Impedanz wird bei hohem Strahlstrom I_h und niedrigem I_l eine lokale 4er-Beule, in deren Bereich die transversale Impedanz integriert gemessen wird, aufgefahren und die entstehenden Orbitstörungen voneinander subtrahiert. Für nicht rotationssymmetrische Störungen muß nach horizontalen und vertikalen Anteilen unterschieden werden. Die entstehende Orbitdifferenz läßt sich durch die lokale transversale Kammerimpedanz $Z_{\perp}(s_0)$, die am Ort s_0 lokalisiert sei, in Abhängigkeit von der Beulen-Amplitude $x(s_0)$, wie folgt beschreiben (hier beispielhaft für die horizontale Ebene):

$$\Delta x(s) = \frac{\sqrt{\beta_x(s_0) \cdot \beta_x(s)}}{2 \cdot \sin(\pi Q_x)} \cdot \cos(\pi Q_x - |\phi_x(s_0) - \phi_x(s)|) \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{(I_h - I_l) \cdot Z_{\perp,x}(s_0) \cdot x(s_0)}{E/e}$$

E ist die Energie der Elektronen und e deren Ladung. Eine analoge Formel gilt für eine vertikale Beule. Auf diese Weise läßt sich die Verteilung der transversalen Impedanz getrennt nach horizontalen und vertikalen Anteilen bestimmen. Auch hier ist die Aussagekraft der Messung durch das relative Auflösungsvermögen des Strahllage-meßsystems limitiert. Je höher dieses ist, desto geringere

Querschnittsveränderungen lassen sich detektieren und bzgl. ihres Beitrages zur Gesamtimpedanz beurteilen.

Diese Meßmethode kann z.B. helfen, Einschränkungen im Querschnitt der Vakuumkammer zu lokalisieren, die sich im normalen Beschleunigerbetrieb nicht offenbaren sondern nur bei bestimmten Betriebsbedingungen störend auftreten und dann nicht als solche erkannt werden.

2.4 Messung der absoluten Strahllage

Unter der Messung der absoluten Strahllage versteht man die Bestimmung der Strahlposition in bezug auf einen definierten Referenzpunkt. Die Wahl dieses Referenzpunktes ist dabei abhängig von dem mit der Messung verfolgten Ziel. Üblicherweise wird angestrebt, die Strahllage bezogen auf eine feste Marke des BPM, meist die Monitormitte, zu bestimmen, um sie dann durch Referenzierung auf beliebige andere Fixpunkte übertragen zu können.

Im weiteren soll nun auf die Bedeutung der absoluten Meßgenauigkeit für den Betrieb einer Beschleunigeranlage eingegangen werden.

2.4.1 Langzeit-Stabilisierung der Strahllage

Die an Synchrotronstrahlungsquellen installierten Beamlines sind nicht nur sehr empfindlich für schnelle Strahlschwingungen, sondern haben meist auch nur eine beschränkte Winkelakzeptanz für die Synchrotronstrahlung. Die Anforderungen sind hier geringer als für das lokale Orbit-Feedback, aber in der Regel muß der Quellpunkt der Synchrotronstrahlung auf ca. $1/10mm$ und der Winkel im Bereich von $1/10mrad$ festgelegt werden.

Bei der ersten Inbetriebnahme einer Beamline wird dazu folgendermaßen vorgegangen: Der Elektronenstrahl wird mittels Beulen im ID transversal verschoben und gekippt, bis an einem in der Beamline installierten Testexperiment die maximale Leistungsfähigkeit der Beamline erreicht wird. Die so gefundene Strahllage in den BPMs vor und hinter dem ID wird abgespeichert und als Referenz für den weiteren Betrieb der Beamline festgelegt.

Oftmals gibt es dabei für verschiedene Betriebsarten der Beamline verschiedene Referenz-Positionen. Diese Prozedur wird für jede Beamline der Anlage wiederholt. Beim routinemäßigen Anfahren der Maschine werden dann mittels einer globalen Orbitkorrektur für alle Beamlines diese Referenzpunkte angefahren. Diese Vorgehensweise spart gegenüber einem wiederholten Einstellen jeder einzelnen Beamline Betriebszeit.

Für den Erfolg dieser Vorgehensweise ist es jedoch absolut notwendig, daß sich die Strahllagemessung in bezug auf den Quellpunkt des IDs mit hoher Genauigkeit reproduzieren läßt. Dies bedeutet, daß die Messung bzgl. des Monitors reproduzierbar ist, oder sich dies zumindest durch eine Kalibrationsmessung erreichen läßt und sich der Monitor nicht relativ zum ID verschoben hat. Die zu erreichende Genauigkeit liegt, wie Erfahrungen an DELTA zeigen, im Bereich von $100\mu m$.

2.4.2 Closed-Orbit-Korrektur

Die Eigenschaften eines Beschleunigers sind durch die realisierte Magnetstruktur bestimmt. Diese besteht aus den Dipolmagneten, die den Strahl auf seiner geschlossenen Bahn führen und den Quadrupolmagneten, die für die Fokussierung sorgen. Weiterhin werden Magnete mit Multipolen höherer Ordnung eingesetzt, deren wichtigster Vertreter der Sextupolmagnet ist. Diese sorgen für chromatische Korrekturen der Teilchenoptik, die notwendig sind, da die fokussierenden Eigenschaften eines Quadrupols von der Teilchenenergie abhängen und der Teilchenstrahl eine endliche Energiebreite aufweist.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, geht man beim Entwurf einer Magnetoptik von der linearen Strahloptik aus, d.h. man berücksichtigt nur Dipol- und Quadrupolmagnete, deren Einfluß auf den Strahl linear von den Ortskoordinaten abhängt. Dadurch wird eine *ideale* Maschine⁷ definiert, in der alle Magnete an ihren Sollpositionen stehen und der Elektronenstrahl exakt durch die Mitte der Magnete führt. Sextupole werden dann im Sinne eines störungstheoretischen Ansatzes hinzugefügt, um die chromatischen Effekte zu kompensieren.

Eine *reale* Maschine⁸ weist unvermeidliche Aufstellfehler auf, d.h. Magnete sind transversal verschoben und gedreht bzgl. ihrer Sollposition aufgestellt. Der sich in so einer Maschine einstellende Closed-Orbit weist in der Regel transversale Ablagen auf. Aufgrund der starken Fokussierung moderner SR-Quellen manifestieren sich Verschiebungen der Quadrupolmagnete um Faktoren von einigen 10-30 verstärkt als Abweichungen vom Design-Orbit. Eine gleichverteilte Fehlaufstellung mit maximalen Ablagen von $\pm 0,1\text{mm}$ kann sich als Orbitstörung mit Amplituden im Bereich von 2mm auswirken. Daher sind Korrekturmagnete, d.h. zusätzliche kleine Dipolmagnete installiert, die eine Beeinflussung des Strahls ermöglichen.

Ziel der Orbit-Korrektur ist es, den Elektronenstrahl möglichst nah an die Soll-Position, d.h. die Mitte der Quadrupol-Magnete, zu bringen. Wie eine Orbitkorrektur durchgeführt wird, ist in Kapitel 2.3.1 beschrieben. Neben dem SVD-Verfahren gibt es eine Vielzahl anderer Algorithmen, z.B. MICADO [18], die an bestimmte Aufgaben, eine maximale Geschwindigkeit oder hohe Genauigkeit, angepaßt sind.

Um die Orbitkorrektur durchführen zu können, ist eine hinreichende Zahl an Korrekturmagneten und BPMs notwendig. Gemäß des Nyquist-Theorems ist eine Zahl von je 4 BPMs und horizontalen und vertikalen Korrekturmagnete pro Betatronperiode ausreichend, d.h. die Zahl der horizontalen bzw. vertikalen Korrekturmagnete beträgt $p \sim 4 \cdot Q_x$ und $q \sim 4 \cdot Q_y$. Die Anzahl der BPMs wird, wenn sie gleichzeitig die Lagemessung in x - und y -Richtung erlauben, durch den größeren Q-Wert bestimmt.

Insbesondere ist es notwendig, daß die BPMs in der Nähe der Quadrupole oder sogar in der Apertur dieser Magnete installiert sind und eine absolute Messung

⁷Mit *idealer* Maschine ist im weiteren immer ein Beschleuniger gemeint, dessen Optik der theoretischen Design-Optik entspricht und der keine Fehlaufstellungen der Magnete aufweist.

⁸Als *reale* Maschine wird eine Beschleunigeranlage bezeichnet, deren Magnete Abweichungen von den Sollpositionen haben.

der Strahlage relativ zur Achse der Quadrupole erlauben. Um dies mit der geforderten Genauigkeit zu erreichen, ist eine Kalibration des Lagemeßsystems notwendig.

Wie diese Kalibration durchgeführt wird, ist in Kapitel 5 beschrieben. Zuerst sollen nun die Anforderungen an die Genauigkeit der Kalibration erarbeitet werden, bevor in Kapitel 3 auf die Theorie der Strahllagemessung und in Kapitel 4 auf das DELTA-Strahllagemeißsystem eingegangen wird.

2.5 Einfluß der Genauigkeit der absoluten Strahllagemessung auf die Betriebsparameter der Beschleunigeranlage

In Abschnitt 2.2 wurde gezeigt, wie die horizontale Emittanz aus den Daten der Magnetstruktur für eine ideale Maschine berechnet werden kann und daß die vertikale Emittanz verschwindet, wenn in dieser Ebene keine Ablenkung des Elektronenstrahls auftritt.

In einer *realen* Maschine findet man jedoch, wie im vorherigen Abschnitt über die Closed-Orbit-Korrektur angesprochen, andere Verhältnisse vor, die durch die Fehlaufstellung der Magnete bestimmt sind.⁹ Daher soll nun beschrieben werden, auf welche Weise fehlaufgestellte Magnete bzw. ein Closed-Orbit, der nicht durch die Mitte der Quadrupol- und Sextupolmagnete geht, die Emittanzen in einer realen Maschine beeinflussen, um dann am Beispiel von DELTA diesen Einfluß mittels Simulationen zu bestimmen. Insbesondere wird dem Umstand Rechnung getragen, daß die Nichtberücksichtigung von Fehlern der Bestimmung der absoluten Strahlage bei der Orbitkorrektur ebenfalls zu einem Einfluß auf die Emittanzen führt.

2.5.1 Zugrundeliegende Parameter

Zur Entstehung einer von Null verschiedenen vertikalen Emittanz tragen im wesentlichen eine nicht verschwindende vertikale Dispersion sowie die Kopplung der Betatron-Schwingungsebenen bei. Zur Untersuchung dieser Effekte können die folgenden, erweiterten Bewegungsgleichungen betrachtet werden [22]:

⁹Es gibt auch noch andere Einflüsse, z.B. eine falsche Bestromung der Magnete oder eine Stromabhängigkeit der k-Werte der Quadrupole, die von der theoretisch angenommenen abweicht. Diese lassen sich jedoch meist leicht erkennen und haben keinen großen Einfluß auf die hier betrachteten Parameter.

$$\begin{aligned}
x'' + \frac{p}{p_0} \left[\left(\frac{1}{R^2} - k \right) \cdot x - \tilde{k} \cdot y + g \cdot (x^2 - y^2) \right] &= \frac{\Delta p}{p_0} \frac{1}{R} + \frac{p}{p_0} \frac{1}{R_{x,Korr}} \\
y'' + \frac{p}{p_0} \left[k \cdot y + \tilde{k} \cdot x + g \cdot x \cdot y \right] &= \frac{p}{p_0} \frac{1}{R_{y,Korr}}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Der Übersichtlichkeit halber wurde in diesen Gleichungen das Argument s der Funktionen weggelassen. Neben den schon in Gleichung 2.1 definierten Größen wird hier die Stärke von um die s -Achse gedrehten Quadrupolen $\tilde{k} = e/p_0 \cdot \partial B_x / \partial x$, die Sextupolstärke $g = e/2p_0 \cdot \partial^2 B / \partial x^2$ sowie der Biegeradius der Korrekturmagnete $1/R_{x/y,Korr}$ verwendet.

Man erkennt, daß durch eine vertikale Ablage des Elektronenstrahls in den Sextupolmagneten oder durch beliebige transversale Ablagen in den gedrehten Quadrupolmagneten eine Kopplung der Bewegungsebenen und durch die Korrekturmagnete zusätzliche Dispersion erzeugt wird. Im weiteren wird auf eine Lösung von Gleichung 2.16 verzichtet. Stattdessen wird eine qualitative Beschreibung der wichtigsten zu berücksichtigenden Einflüsse gegeben, um dann mittels Simulationsrechnungen den Einfluß für DELTA zu bestimmen und quantitativ anzugeben.

Zu unterscheiden ist zwischen Effekten, die wie in Gleichung 2.5 angegeben, zu einer Quanten-Anregung des Strahls durch Synchrotronstrahlung auch in der vertikalen Ebene führen und denen, die eine Kopplung des 6-dimensionalen Phasenraumes (horizontal, vertikal und longitudinal) bewirken und damit lediglich eine Umverteilung des ansonsten konstanten 6-dimensionalen Phasenraumvolumens ergeben.

Auf die Kopplung von Synchro-Betatron-(longitudinal-transversal)-Oszillationen wird hier nicht eingegangen, sondern nur die Kopplung der beiden transversalen Ebenen betrachtet. Es sei $\varepsilon_{x,0}$ die horizontale Gleichgewichtsemittanz. Für reine Betatron-Kopplung gibt man den Kopplungsfaktor $\kappa < 1$ an und gewinnt daraus folgende Beziehung für die Emittanzen:

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_{x,0}}{1 + \kappa} \quad \text{und} \quad \varepsilon_y = \frac{\kappa}{1 + \kappa} \cdot \varepsilon_{x,0} \tag{2.17}$$

Für $\kappa \ll 1$ geht Gleichung 2.17 in Gleichung 2.7 aus Abschnitt 2.2 über. Weiterhin erkennt man, daß $\varepsilon_x + \varepsilon_y = \varepsilon_{x,0}$ im Sinne eines Erhaltungssatzes gilt, d.h. die vertikale Emittanz entsteht durch den Übertrag von Energie aus der horizontalen in die vertikale Ebene. Es ist anzumerken, daß eine reine Kopplung im Prinzip durch den Einsatz von Skew-Quadrupolen¹⁰ in weiten Bereichen eingestellt werden kann.

Neben diesen Effekten, die die vertikale Emittanz global beeinflussen, gibt es lokal wirkende, die den Querschnitt des Elektronenstrahls verändern. Im weiteren

¹⁰Skew-Quadrupole sind um 45° Grad um die s -Achse gedrehte Quadrupolmagnete.

wird nun beschrieben, welcher Effekt die Emittanz bzw. den Strahlquerschnitt beeinflusst.

Jede zusätzliche horizontale oder vertikale Dipolfeldkomponente, die auf den Elektronenstrahl wirkt, erzeugt Dispersion und kann zu einer Vergrößerung der Gleichgewichtsemittanz nach Gleichung 2.5 führen. Diese zusätzlichen Dipolfeldanteile entstehen in allen Quadrupol- und Sextupolmagneten, die der Strahl nicht auf der Magnetachse passiert und in um die s -Achse verkippten Dipolen, wobei dieser Einfluß in der Regel zu vernachlässigen ist. In der horizontalen Ebene wird die Dispersion durch die Dipolmagnete dominiert. Daher ist der Einfluß auf die horizontale Emittanz klein. In der vertikalen Ebene sollte dagegen die Dispersion der idealen Maschine verschwinden. Hier kommt es zu einer deutlichen Beeinflussung der Emittanz durch die genannten Effekte. Eine vertikale Ablage in Sextupolmagneten führt, wie man an Gleichung 2.16 erkennt, außerdem zu einer Kopplung der transversalen Bewegungsebenen und damit zu einer Transformation der horizontalen Emittanz in die vertikale Ebene. Gleiches gilt für den Einfluß von um die longitudinale Achse verdrehten Quadrupolen auf die Emittanz.

Durch die Kopplung der Bewegungsebenen kommt es außerdem zu einer Transformation der horizontalen Dispersion in die vertikale Ebene, wodurch eine zusätzliche Quantenanregung der vertikalen Emittanz stattfinden kann.

Eine nicht verschwindende vertikale Dispersion führt nicht nur zu einer Vergrößerung der vertikalen Emittanz sondern auch zu einer lokalen Vergrößerung der Strahlbreite. Wie in Gleichung 2.10 muß der Term unter der Wurzel in der Formel für die Berechnung der vertikalen Strahlgröße um den Term $\left(D_y(s) \cdot \frac{\Delta p}{p_0}\right)^2$ ergänzt werden. Es kommt zu einer Projektion des longitudinalen Phasenraums in die vertikale Ebene und damit zu einer Vergrößerung der vertikalen Strahlbreite.

Ein von den Magnetachsen abweichender Closed-Orbit führt somit auf vielfältige Weise zu einer Veränderung der vertikalen Emittanz. Dieser entsteht in realen Maschinen durch Fehlaufstellungen der Magnete und eine nicht ausreichende Orbit-Korrektur, wenn die Meßwerte der BPMs nicht auf die Achsen der Magnete kalibriert sind und daher mit Offsets behaftet sind. In einer solchen Anlage führt die Orbitkorrektur, wenn sie auch in der Lage ist, alle gemessenen Ablagen zu korrigieren, zu einem Orbit mit Offsets durch die Magnete und damit zu einer Beeinflussung der vertikalen Emittanz.

2.5.2 Simulation des Einflusses auf DELTA

In einer ersten Reihe von Simulationen wurde der Einfluß von Offsets des Closed-Orbit-Meßsystems auf die vertikale Emittanz untersucht. Dazu wurde das Program MAD (Methodic Accelerator Design [18]) eingesetzt, das vielfältige Berechnungen bezüglich der Eigenschaften von Beschleunigeroptiken erlaubt. MAD arbeitet während seiner Ausführung eine Steuer-Datei ab, die zu Beginn eine Beschreibung der Beschleunigeroptik enthält. In dieser werden alle Elemente der Optik, d.h. Dipole, Quadrupole, Sextupole (auch höhere Multipole sind möglich),

Korrekturmagnete, Strahllage-monitore, Driftstrecken und die Beschleunigungs-cavität, zusammen mit ihrer Länge, ihren magnetischen und sonstigen Eigen-schaften, aufgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Optik-Version DELTA006 [23] verwendet und bei einer Teilchenenergie von $1,28\text{GeV}$ gerechnet, da dies der Hauptbetriebsmodus von DELTA während der Zeit der Durchführung dieser Arbeit war und die meisten Messungen bei dieser Einstellung durchgeführt wurden.

MAD erlaubt die Definition von Aufstellfehlern für jedes Element der Optik und auch die Berücksichtigung von Offsets in der Bestimmung der Strahllage mit den BPMs. Außerdem läßt der Befehlsumfang die Berechnung des Closed-Orbits und vieler weiterer Parameter, natürlich auch der Emittanzen, die sich in dieser *realen* Maschine einstellen, zu. Weiter ist es möglich, mittels des integrierten MICADO-Algorithmus eine Orbit-Korrektur durchzuführen und erneut die Emittanzen und alle weiteren relevanten Parameter auszugeben.

Ziel der ersten Simulation war es, den Einfluß von Offsets in der Strahllage-messung auf die *ideale*, d.h. die nicht mit Aufstellfehlern behaftete, DELTA006 Optik zu untersuchen. Dazu wurden den BPMs Meßfehler aufgeprägt, dabei ist offen gelassen, ob diese durch transversale Fehlpositionierungen der BPMs oder durch Fehler in der Meßelektronik entstehen, die zu Offsets in der Strahllagemes-sung führen. Diese Meßfehler wurden in der horizontalen und vertikalen Ebene jedem der 40 BPMs, die sich in Quadrupolmagneten befinden, als gleichverteilter Zufallswert mit einem absoluten Maximalwert zugeordnet. Anschließend wurden jeweils für 250 unterschiedliche Verteilungen mit dem gleichem Maximalwert eine Orbitkorrektur mit diesen Meßfehlern durchgeführt und die Emittanzen sowie die rms-Werte der Kickstärken der horizontalen und vertikalen Korrekturmagnete ausgelesen.

Zur Durchführung dieser Simulation wurden in der Interpreter-Sprache Tcl/Tk [24] Stapelverarbeitungsprogramme entwickelt, die nach Übergabe einiger Konfigurationsparameter automatisch die Simulationsläufe steuern, die Ergebnis-se aus den Ausgabedateien von MAD extrahieren und in geordneter Weise einer weiteren Verarbeitung zugänglich machen.

Das Ergebnis dieser ersten Simulationsreihe ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Es wurden die Mittelwerte über alle 250 Simulationen des Verhältnisses von verti-kaler zu horizontaler Emittanz $\varepsilon_y/\varepsilon_x$ sowie der rms-Werte der Kickstärken θ_x und θ_y der Korrekturmagnete gegen die Maximalwerte der transversalen BPM-Offsets $(0,01\text{mm}; 0,05\text{mm}; 0,1\text{mm}; 0,5\text{mm}; 1,0\text{mm}; 2,0\text{mm})$ aufgetragen. Man erkennt wie die Kopplung mit wachsenden BPM-Offsets schnell größer wird und wie die Korrektorstärken nahezu linear mit den Offsets ansteigen. Dabei fällt auf, daß die notwendige vertikale Korrektorstärke für die Orbit-Korrektur doppelt so groß ist wie die horizontale. Dies ist begründet in dem ungünstigeren Phasenvorschub zwischen den Korrekturmagneten und den BPMs in der vertikalen Ebene.

Dieses Diagramm erlaubt eine Forderung an die absolute Meßgenauigkeit der Strahllagebestimmung in bezug auf die Quadrupolachsen aufzustellen. Ziel einer 3. Generation SR-Quelle ist es, in den 10^{-3} -Bereich der Emittanzkopplung vorzu-stoßen. Um zu verhindern, daß der absolute Meßfehler des Lagemeßsystems die vertikale Emittanz limitiert, ist eine absolute Meßgenauigkeit von kleiner $100\mu\text{m}$

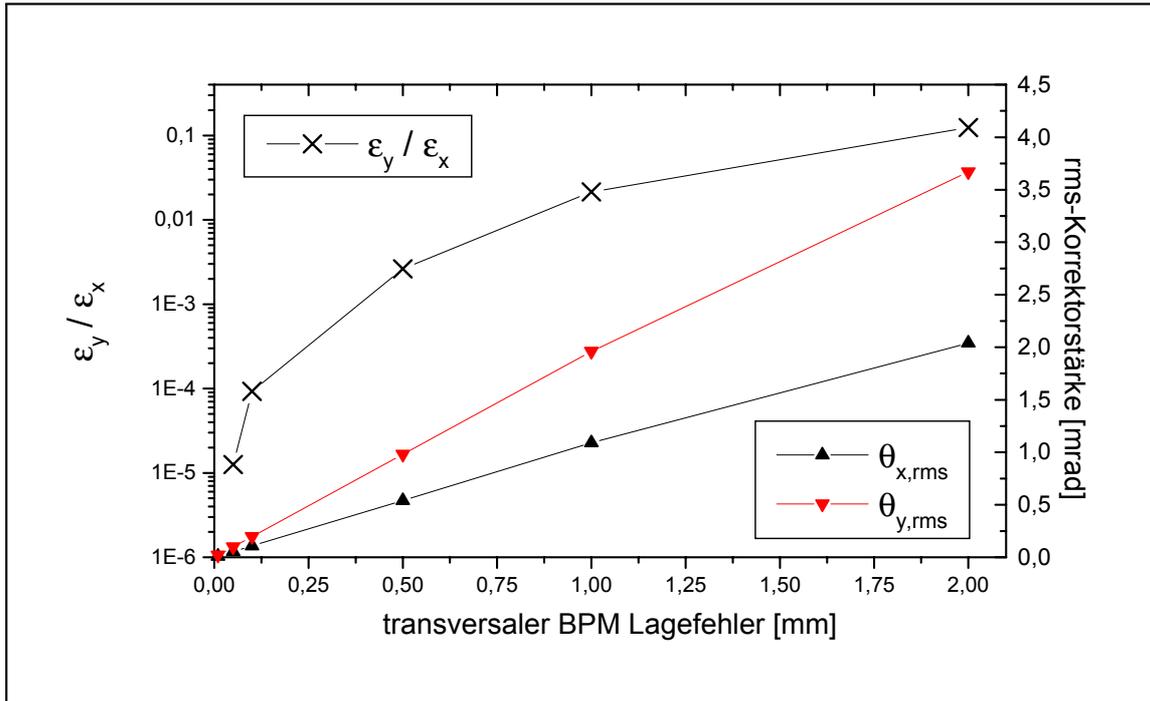


Abbildung 2.3: Dargestellt ist jeweils der Mittelwert über 250 Simulationsläufe für einen gleichverteilten, transversalen Offset der BPMs mit dem auf der Abszissenachse aufgetragenen absoluten Maximalwert. Aufgetragen ist das sich nach durchgeführter Orbit-Korrektur einstellende Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Emittanz sowie die rms-Werte der Kickstärken der Korrekturmagnete. Simulationparameter: DELTA006-Optik, $E = 1,28 GeV$, die horizontale Gleichgewichtsemittanz beträgt $\varepsilon_x = 15,9 nm rad$.

in bezug auf die Quadrupolachsen zu erreichen.

Bedenkt man weiter, daß die maximale Kickstärke (bei der Maximalenergie DELTAs von $1,5 GeV$) der horizontalen Korrekturmagnete $2,6 mrad$, die der vertikalen nur $0,9 mrad$ beträgt, so führen größere BPM-Offsets schnell zu ungünstigen Situationen bei der Einstellung der Korrekturmagnete. Man verliert wertvollen Hub in den Kickstärken, der für Beulen zur Anpassung der Strahlage an bestimmte Betriebsbedingungen einzelner Beamlines notwendig ist.

Eine weitere Simulationsreihe wurde durchgeführt, um den Einfluß der BPM-Offsets bei der Orbit-Korrektur in einer *realen*, d.h. mit Fehlauflagestellungen der Magnete behafteten Beschleunigeranlage, zu studieren. Dazu wurden im Vorgriff auf Kapitel 6 die für DELTA gemessenen Offsets des Lagemeßsystems¹¹ verwendet und jeweils für 250 statistisch fehlaufgestellte Optiken eine Korrektur des sich einstellenden gestörten Orbits vorgenommen. Die Korrektur wurde einmal in

¹¹Um der verbleibenden Ungenauigkeit in der absoluten Kalibration Rechnung zu tragen, wurde diesen Offsets noch ein zwischen $\pm 0,1 mm$ gleichverteilter Fehler addiert.

bezug auf die Quadrupolachsen durchgeführt, d.h. so durchgeführt wie in der *realen* Maschine, wenn die Offsets des Lagemeßsystems bekannt sind, und ein weiteres mal wurden die gemessenen Offsets als Lagefehler in die Closed-Orbit-Korrektur von MAD eingespeist.

Die 250 fehlaufgestellten Optiken wurden ähnlich wie in der ersten Simulationsreihe erzeugt. Es wurde jeweils ein Maximalwert für die absolute transversale Fehlaufstellung der Quadrupol- und Sextupolmagnete in horizontaler und vertikaler Richtung vorgegeben (0, 01mm; 0, 1mm; 0, 2mm; 0, 4mm; 0, 6mm; 0, 8mm) und dann für alle Magnete ein gleichverteiltes Ensemble berechnet. Außerdem wurde jeder Magnet um seine 3 Achsen (x, y, s) mit einem absoluten Maximalwert von 0, 1mrad in jede Richtung verdreht.

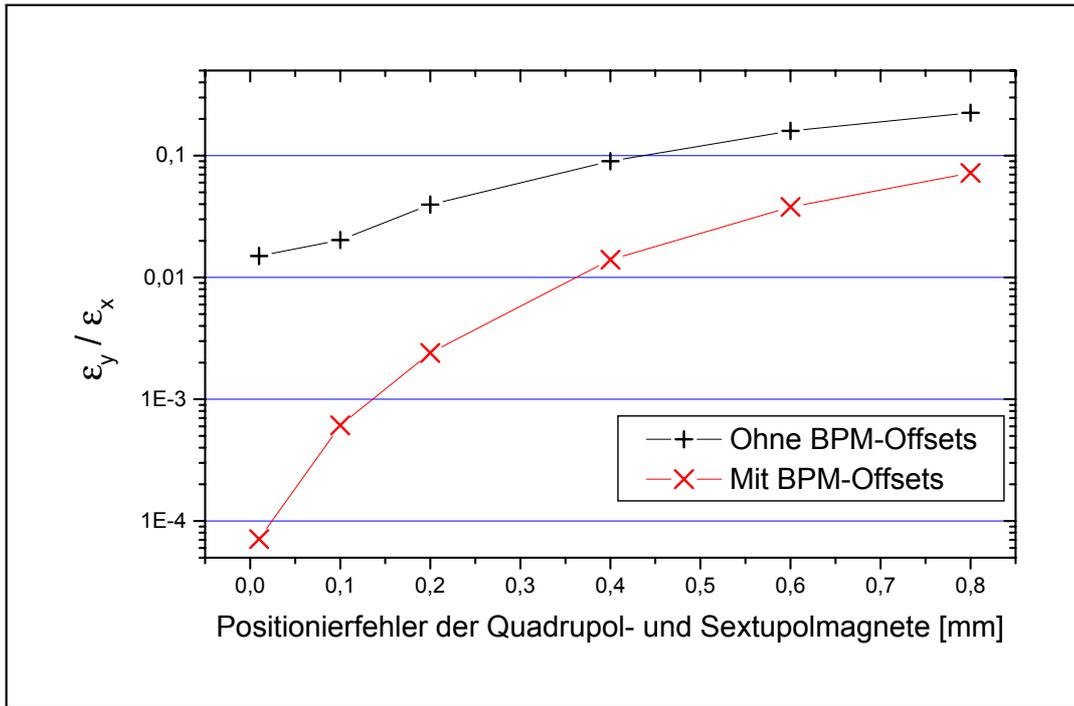


Abbildung 2.4: Abgebildet ist das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Emittanz nach der Orbit-Korrektur in DELTA für verschiedene Maximalwerte der transversalen Fehlaufstellung von Quadrupol- und Sextupolmagnete einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der BPM-Offsets. Alle Magnete sind außerdem um maximal 0, 1mrad um die drei Koordinatenachsen x, y, s gedreht. Es wurde jeweils der Mittelwert für 250 gleichverteilt fehlaufgestellte Optiken berechnet.

In Abbildung 2.4 ist wieder der Mittelwert des Verhältnis von ϵ_y / ϵ_x der 250 statistisch fehlaufgestellten Maschinen, für jeden Maximalwert der transversalen Fehlaufstellung, einmal für die Korrektur auf die Quadrupolachsen (mit BPM-Offsets) und einmal für den Fall, daß die Orbitkorrektur die absoluten Meßfehler des Lagemeßsystems (ohne BPM-Offsets) nicht berücksichtigt, dargestellt.

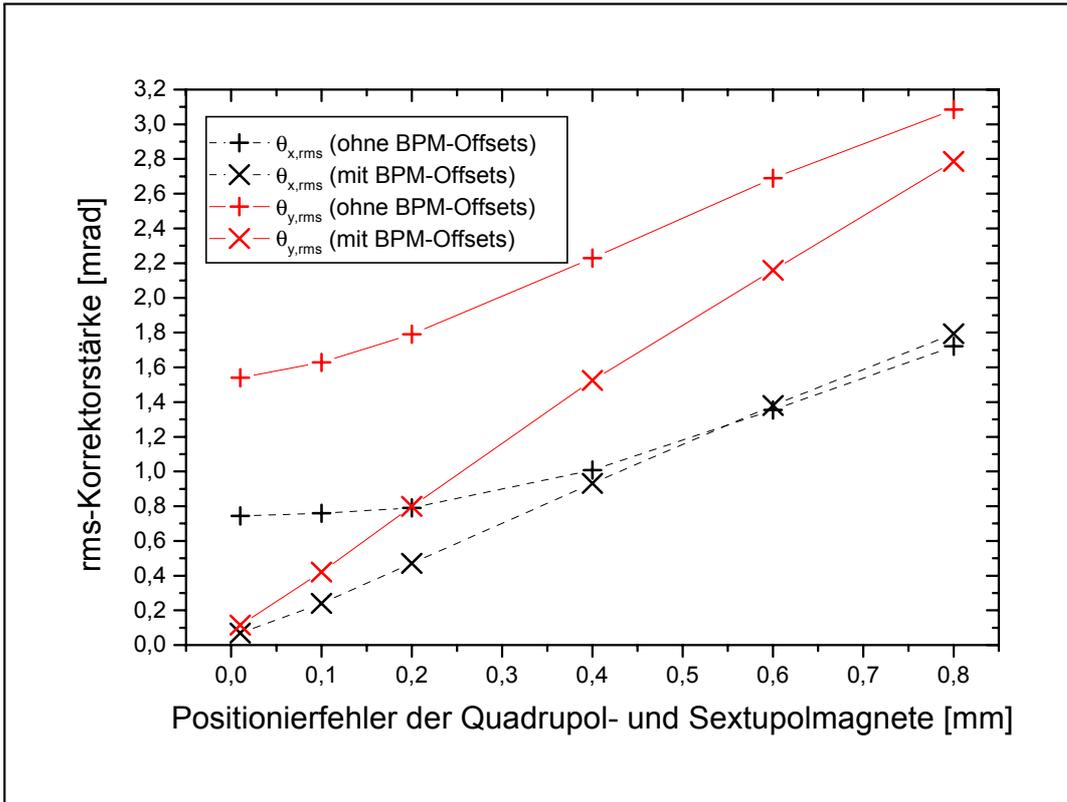


Abbildung 2.5: Abgebildet sind die rms-Werte der horizontalen und vertikalen Kickstärken nach der Orbit-Korrektur in DELTA, für verschiedene Maximalwerte der transversalen Fehlauflistung von Quadrupol- und Sextupolmagnete, einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der BPM-Offsets. Alle Magnete sind außerdem um maximal $0,1\text{mrad}$ um die drei Koordinatenachsen x, y, s gedreht. Es wurde jeweils der Mittelwert für 250 gleichverteilt fehlaufgestellte Optiken berechnet.

Man erkennt, daß selbst wenn die Aufstellfehler der Magnete sehr klein sind ($0,01\text{mm}$), der absolute Meßfehler der Lagemessung zu einer Kopplung von größer 1% führt und daß diese mit wachsenden Aufstellfehlern der Magnete bis in den Bereich von $> 10\%$ ansteigt. Sind die Offsets auf $\pm 0,1\text{mm}$ bekannt, so kann die vertikale Emittanz deutlich reduziert werden, und zwar bei einem maximalen Aufstellfehler der Magnete von $< 0,35\text{mm}$ um mindestens eine Größenordnung. Die Kopplung ist dann kleiner als 1%. An Synchrotronstrahlungsquellen wird angestrebt, Aufstellfehler der Magnete von kleiner $0,1\text{mm}$ zu erreichen, damit ist dann eine Kopplung von kleiner 0,1% zu erreichen.

In der Abbildung 2.5 wurden in gleicher Weise der Mittelwert der rms-Werte der mittleren Korrektorstärken in horizontaler und vertikaler Richtung der 250 Simulationsläufe aufgetragen. Auch hier erkennt man, daß wenn die Lagemessung die absoluten Meßfehler wie sie für DELTA bestimmt wurden nicht berücksichtigt,

auch ohne Fehlaufstellungen der Magnete große Korrektorstärken für die Orbitkorrektur notwendig sind, die die an DELTA erzielbaren, bei der Endenergie von $1,5\text{GeV}$, in der vertikalen Ebene übersteigen. Sind die Offsets bekannt, so können im Bereich transversaler Fehlaufstellungen von bis zu $\pm 0,3\text{mm}$ die notwendigen Kickstärken deutlich reduziert werden. Bei weiter ansteigenden Aufstellfehlern der Magnete überdecken diese jedoch, zumindest was die notwendigen Korrektorstärken betrifft, den Einfluß der absoluten Lagemeßfehler und die Werte für eine Korrektur mit und ohne BPM-Offsets nähern sich asymptotisch an.

Abschließend bleibt festzuhalten, daß für die Genauigkeit der absoluten Strahllagemessung ein Wert von $< 100\mu\text{m}$ zu fordern ist. Dieser Wert garantiert, daß der Meßfehler des Lagemeßsystems in keiner Weise die erreichbare vertikale Emittanz limitiert und daß es zu keinen unnötig hohen Stärken der Korrekturmagnete kommt.

Kapitel 3

Theorie der Strahllagemessung

Bevor auf den für die Strahllagebestimmung essentiellen Begriff der Signalfunktion eingegangen und gezeigt wird, wie diese berechnet wird, sollen exemplarisch verschiedene Methoden zur Gewinnung lageabhängiger Meßsignale des Elektronenstrahls beschrieben werden.

Anschließend wird gezeigt, wie die Meßsignale verarbeitet werden, um daraus die Lageinformation zu gewinnen, und welchen Einfluß die transversalen Strahl-dimensionen auf diese haben. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem Exkurs über die Möglichkeit, die Strahlemittanz aus den Signalen eines Strahllagemonitors zu bestimmen.

3.1 Methoden der Strahllagemessung

Die verwendete Methode ist abhängig von der Art der Beschleunigeranlage und ihrem Einsatzzweck. Generell muß zwischen strahlzerstörenden und zerstörungsfreien Meßmethoden unterschieden werden. In Linearbeschleunigern werden oft Fluoreszenzschirme, z.B. aus Chromoxid, eingesetzt, die unter 45° in den Strahlweg gefahren werden. Bei Durchtritt des Strahls entsteht eine nachleuchtende Fluoreszenzerscheinung, die mit einer CCD-Kamera beobachtet werden kann und die Bestimmung des Strahlprofils und der Strahllage, auch für Strahlen geringer Intensität, ermöglicht. Diese Schirme weiten den Strahl beim Durchtritt auf, so daß sie während des Routine-Betriebs herausgefahren werden müssen und nur dem Einstellen des Beschleunigers bei der Inbetriebnahme dienen.

In Ionenbeschleunigern werden oft Wire-Scanner eingesetzt. Hier wird ein dünner Draht transversal durch die Kammer bewegt und der Strom gemessen, der entsteht, wenn der Teilchenstrahl zur Sekundärelektronen-Emission aus dem Draht führt. Durch Korrelation des gemessenen Stroms und der Position des Drahtes läßt sich ebenfalls Strahlprofil und -lage bestimmen. Auch dieser Monitortyp stört den gespeicherten Teilchenstrahl durch Aufweitung und Energieverlust und ist daher im Routinebetrieb nicht permanent einsetzbar.

Soll der Strahl möglichst wenig durch die Messung beeinflusst werden, so bieten sich Methoden an, die an die den Strahl begleitenden elektrischen oder magne-

tischen Felder koppeln. An DELTA liegt die Energie der gespeicherten Elektronen zwischen $0,3\text{GeV}$ und $1,5\text{GeV}$, woraus sich ein relativistischer γ -Faktor ($E = \gamma m_0 c^2$, $m_0 c^2 = 511\text{keV}$ für Elektronen) von etwa 600 bis 3000 ergibt. Die longitudinalen Feldkomponenten sind daher im Ruhesystem des Beschleunigers stark lorentzkontrahiert und somit wird der Elektronenstrahl von rein transversalen Feldern, einem radialen elektrischen und einem zirkularen magnetischen, ähnlich dem TEM-Mode eines Koaxialleiters, begleitet.

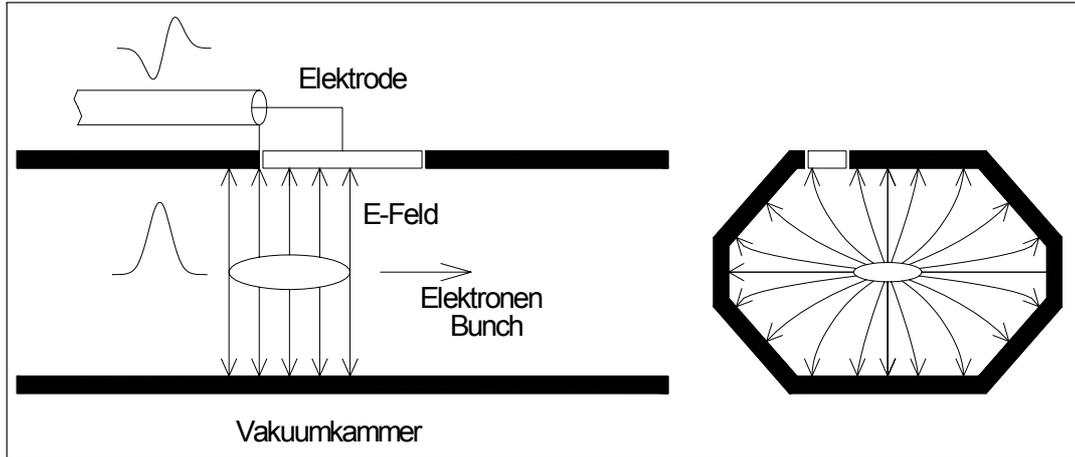


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Strahllagemonitors mit kapazitiven Pickup-Elektroden. Links ist ein Längsschnitt, rechts ein Querschnitt durch die Kammer, jeweils mit dem Elektronenbunch und den transversalen elektrischen Feldern dargestellt.

In Abbildung 3.1 ist die Funktionsweise eines Monitors, der an die elektrischen Felder des Strahls koppelt, schematisch dargestellt. Rechts ist ein Längsschnitt, links ein Querschnitt durch den Monitor mit einer Elektrode abgebildet. Diese Art von BPM mit kapazitiven Pickup-Elektroden hat sich an Elektronenspeicherringen zur Lagemessung durchgesetzt und wird auch an DELTA eingesetzt.

Die den Elektronenstrahl begleitenden radialen elektrischen Felder enden senkrecht auf der als ideal leitend angenommenen Vakuummkammer aus Edelstahl. Der Strahl mit seiner gaußförmigen longitudinalen Ladungsverteilung wird von einer auf der Kammerwand fließenden Spiegelladung begleitet, die integriert über den Umfang longitudinal der Ladungsverteilung des Strahls entspricht, allerdings mit umgekehrten Vorzeichen.

Die lokale Ladungsdichte auf dem Umfang der Kammer ist dagegen durch den Querschnitt der Kammer und der Position des Strahls in der Kammer bestimmt. Die Pickup-Elektrode ist isoliert von der Vakuummkammer, bündig in diese eingelassen. Passiert der Strahl den Bereich der Elektrode, so wird abhängig von der Position des Strahls im Monitorquerschnitt und dem Strahlstrom, d.h. der Ladungsmenge im Bunch, eine Ladung auf der Elektrode induziert, die wieder abfließt, wenn der Strahl den Monitor verläßt. Dieser Ladungsstoß entspricht

einem Strom $\frac{dq}{dt}$, der über die Impedanz Z_0 - welche bestimmt ist durch die Geometrie der Elektrode und die Kabelimpedanz - fließt und als Spannungssignal nachgewiesen werden kann. Ist lediglich ein Elektronenbunch im Beschleuniger gespeichert, so wiederholt sich dieser Puls mit der Umlauffrequenz. An DELTA sind dies $2,6033\text{MHz}$. Das Frequenzspektrum des Signals enthält alle Harmonischen der Umlauffrequenz, bis im Bereich einiger GHz die endliche Bunchlänge zu einem Abfall der Amplitude der Umlaufharmonischen führt. Unabhängig davon, ob das Spannungssignal über eine Spitzenwert-Detektion Umlauf für Umlauf gewonnen wird oder eine schmalbandige Messung im Frequenzbereich einer höheren Umlaufharmonischen durchgeführt wird, läßt sich das Meßsignal U_i des i -ten Pickup folgendermaßen schreiben:

$$U_i(x, y) = k_i(I) \cdot S_i(x, y) \quad (3.1)$$

S_i ist die dimensionslose Signalfunktion des i -ten Pickup. Diese beschreibt die nur von der Position (x, y) des Elektronenstrahls im Monitor abhängige Antwort des i -ten Pickups. Diese Funktion ist frei normierbar und hier wird diese so gewählt, daß ein sich direkt vor der Elektrode befindlicher Elektronenstrahl einen Wert der Signalfunktion von 1000 aufweist. Der Übertragungsfaktor k_i des i -ten Pickup enthält die Stromabhängigkeit des Meßsignals, meist gilt $U_i \sim I$, und die Skalierungsfaktoren aufgrund des Meßprinzips und der Art der Signalverarbeitung.

Weisen alle Elektroden die gleiche Oberfläche und Impedanz auf und sind die Meßelektroniken identisch, sind auch die k_i aller Pickups des BPM identisch und können einfach als k geschrieben werden. Sind für jeden Pickup die Signalfunktionen $S_i(x, y)$ bekannt, so ist durch die Messung von 3 dieser Signale die Bestimmung der Strahllage und des Stromes möglich. Meist werden jedoch 4 oder mehr Elektroden eingesetzt, worauf in Abschnitt 3.4 näher eingegangen wird. Zur Bestimmung der Strahllage ist es daher zwingend notwendig, die Signalfunktion eines jeden Pickup zu kennen.

3.2 Berechnung der Signalfunktion eines Strahl-lagemonitors mit Pickup-Elektroden

Im vorherigen Abschnitt wurde der Begriff der Signalfunktion eingeführt. Diese wurde als die nur von der transversalen Position des Elektronenstrahls im BPM abhängige Antwortfunktion einer Pickup-Elektrode definiert. Es wurde allerdings nicht darauf eingegangen, ob und wie die transversalen Strahldimensionen zu berücksichtigen sind.

In früheren Arbeiten wurde dem Einfluß der transversalen Strahldimensionen wenig Bedeutung beigemessen, daher ist die Signalfunktion meist nur für Teilchenstrahlen ohne transversale Ausdehnung, d.h. für Linienladungen berechnet worden. Da die so bestimmten Signalfunktionen eine eindeutige Kenngröße des BPM und seiner Pickup-Geometrie sind, wird auch in dieser Arbeit die Signalfunktion als Antwortfunktion für linienförmige Teilchenstrahlen definiert

und berechnet, um dann in einem weiteren Schritt den Einfluß der transversalen Strahldimensionen zu untersuchen.

3.2.1 Signalfunktion einer Linienladung

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, können die den Strahl begleitenden Felder als rein transversal betrachtet werden. Somit ist es möglich, die Berechnung der Signalfunktion auf ein 2-dimensionales Problem zurückzuführen, d.h. es braucht nur ein transversaler Schnitt durch den BPM in der Ebene der Pickups betrachtet werden; der longitudinalen Ausdehnung der Pickup-Elektrode und ihrer Querschnittveränderung wird dann nachträglich Rechnung getragen.

Die Ladungsverteilung eines linienförmigen Elektronenstrahls mit dem Ladungsbelag q/ds am Ort (x, y) in der Ebene des BPM läßt sich wie folgt schreiben:

$$\rho(x', y') = \frac{q}{ds} \cdot \delta(x' - x) \cdot \delta(y' - y) \quad (3.2)$$

mit

$$\delta(x - a) = 0 \text{ für } x \neq a$$

$$\int_b^c \delta(x - a) dx = \begin{cases} 1 & \text{für } a \in [b, c] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Diracsche Deltafunktion}$$

Der naheliegende Weg zur Berechnung der Signalfunktion S_i des i -ten Pickup führt über die Lösung der 2-dimensionalen Poisson-Gleichung

$$\nabla^2 \varphi(x', y') = -\frac{\rho(x', y')}{\varepsilon_0}$$

unter der Randbedingung, daß die ideal leitende Vakuumkammer auf Potential Null gesetzt ist. Aus der Potentialfunktion $\varphi(x', y')$ läßt sich das elektrische Feld

$$\vec{E}(x', y') = -\nabla \varphi(x', y')$$

und daraus die auf der Kammerwand induzierte Linienladungsdichte

$$\lambda(x', y') = \varepsilon_0 \cdot \vec{n}(x', y') \cdot \vec{E}(x', y') \cdot ds$$

berechnen. Der Faktor ds sorgt für die korrekte Dimension der Linienladungsdichte und trägt der Translationsinvarianz des Systems in s -Richtung Rechnung. $\vec{E}(x', y')$ ist das von der Ladung q am Ort (x, y) erzeugte elektrische Feld auf der Kammerwand und $\vec{n}(x', y')$ der zugehörige Normalenvektor zur Kammeroberfläche an dieser Stelle.

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, gewinnt man die Signalfunktion S_i des i -ten Pickup, indem man die Linienladungsdichte über dessen Querschnittsanteil L_i integriert:

$$S_i(x, y) = k \cdot \int_{L_i} \lambda(x', y') dl \quad (3.3)$$

k ist dabei die Normierungskonstante in der Einheit $[1/C]$.

Eine analytische Berechnung der Signalfunktion ist aufgrund der komplizierten Geometrie moderner BPMs, die den Querschnitt der Vakuumkammer beibehalten, nicht möglich. Um daher ein gutes Abbild der Signalfunktion zu erhalten, muß diese für viele Punkte numerisch berechnet werden. Dies ist bei Verwendung von Gleichung 3.3 sehr aufwendig, da für jeden neuen Punkt die Poisson-Gleichung gelöst werden und die Integration durchgeführt werden muß.

Wesentlich effizienter ist die Berechnung der Signalfunktion, wenn das Reziprozitäts-Theorem [25] benutzt wird. Zur Bestimmung der Signalfunktion ist dann nur noch die Lösung der 2-dimensionalen Laplace-Gleichung

$$\vec{\nabla}^2 \varphi_i(x, y) = 0 \quad (3.4)$$

unter der Randbedingung, daß der i -te Pickup auf einem festen Potential φ_0 gegenüber der Vakuumkammer liegt, erforderlich. Das Reziprozitäts-Theorem besagt, daß die durch die Ladung q am Ort (x, y) auf dem Pickup induzierte Ladung Q proportional zu der nach Gleichung 3.4 bestimmten Potentialfunktion $\varphi_i(x, y)$ und somit auch proportional zur Signalfunktion ist:

$$S_i(x, y) = k \cdot \varphi_i(x, y) \quad (3.5)$$

k ist wiederum die Normierungskonstante, hier mit der Einheit $[1/V]$.

Dieser Ansatz erlaubt die Bestimmung der Signalfunktion eines Pickup im ganzen Querschnitt des Monitors durch einmaliges Lösen der Laplacegleichung 3.4 unter Berücksichtigung entsprechender Randbedingungen.

Für den DELTA-Strahllagemonitor (Abschnitt 4.1) mit seinen 4 Pickup-Elektroden wurden die Signalfunktionen mit dem Programmpaket MAFIA, Version 4.0 [26], berechnet. Dieses Programm ermöglicht die Lösung der Maxwell-Gleichungen für eine Vielzahl statischer und dynamischer Probleme. Es erfordert die Definition der zu analysierenden Geometrie auf einem diskreten Punktgitter und berechnet numerisch für jeden definierten Gitterpunkt etwa die Lösung der Laplace-Gleichung bei gegebenen Randbedingungen. Für den DELTA-Strahllagemonitor wurde ein Punktgitter mit dem Koordinatenursprung in der Monitormitte und einem Gitterabstand in x - und y -Richtung von $0,25mm$ für den gesamten Monitor gewählt. Dieses Gitter erlaubt eine präzise Abbildung des Strahllagemonitors und ist für die weiteren Untersuchungen hinreichend fein.

Aufgrund der x -Achsen-Spiegelsymmetrie des DELTA-BPM (Abbildung 4.1) gilt folgender Zusammenhang für die Signalfunktionen:

$$S_3(x, y) = S_1(x, -y) \quad \text{und} \quad S_4(x, y) = S_2(x, -y) \quad (3.6)$$

daher ist es ausreichend, die Signalfunktion S_1 und S_2 für die beiden oberen Pickup-Elektroden zu berechnen.

In Abbildung 3.2 ist das Ergebnis der MAFIA-Berechnung der Signalfunktion S_1 des linken oberen Pickup des DELTA-BPM abgebildet. Die in Abschnitt 3.1 angesprochene Normierung wird erreicht, indem das Potential des Pickup zu 1000V und das des Monitorblocks zu 0V gewählt wurden. Die Signalfunktion ist durch Isosignallinien, d.h. Linien gleichen Wertes der Signalfunktion, repräsentiert. Dabei wurden die Werte, für die Isosignallinien gezeichnet wurden, in 32 äquidistanten Schritten zu $\simeq 30V$ gestaffelt. Man erkennt deutlich den nichtlinearen Verlauf der Signalfunktion.

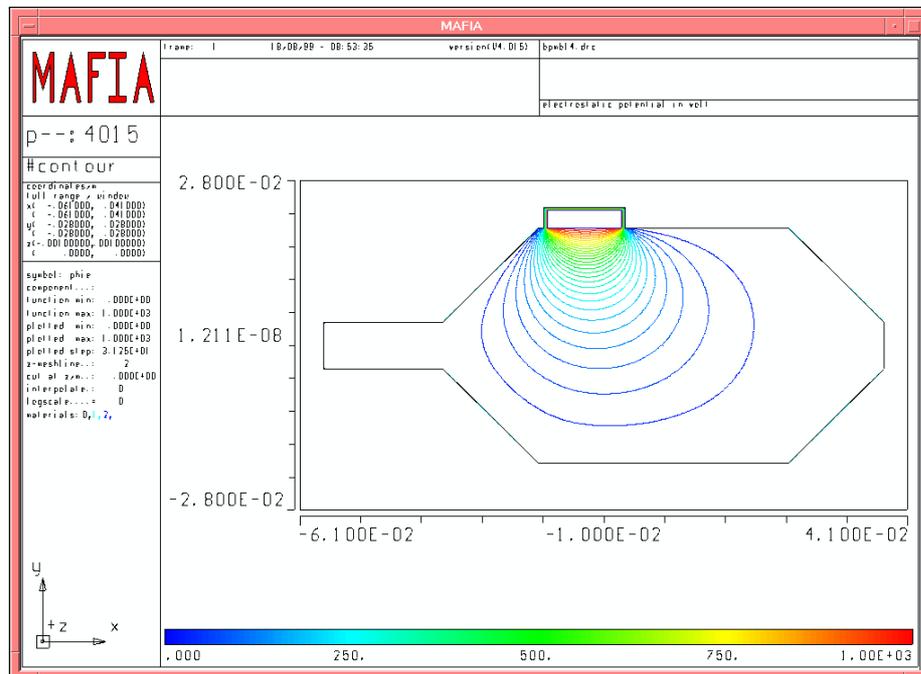


Abbildung 3.2: Abgebildet ist das Ergebnis der MAFIA-Berechnung der Signalfunktion S_1 . Der Pickup wurde auf ein Potential von 1000V, der Monitorblock auf 0V, gelegt. Die Signalfunktion ist durch Isosignallinien repräsentiert, die in 32 äquidistanten Schritten dargestellt sind. Der Abstand der Gitterpunkte beträgt in x - und y - Richtung 0,25mm.

Nachdem nun beschrieben wurde, wie durch die Lösung eines 2-dimensionalen Problems die Signalfunktionen berechnet werden können, muß noch auf die Ausdehnung der Elektrode in longitudinaler Richtung eingegangen werden. Die Pickup-Elektroden des DELTA-BPM haben eine kreisförmige Oberfläche mit

10, 8mm Durchmesser. Um dieser longitudinalen Querschnittsveränderung Rechnung zu tragen, wird der Pickup i in n Streifen der Breite b_j und Länge l_j zerlegt. Für jeden dieser Streifen der Breite b_j wird dann die Signalfunktion S_i^j berechnet. Die Signalfunktion S_i des i -ten Pickup läßt sich dann als gewichtetes Mittel der S_i^j berechnen:

$$S_i(x, y) = \sum_{j=1}^n \frac{l_j \cdot S_i^j(x, y)}{l_1 + \dots + l_n}$$

Untersuchungen am DELTA-BPM [27] haben gezeigt, daß die so berechneten Signalfunktionen sehr gut mit den gemessenen übereinstimmen. Zur Durchführung dieser Messungen wurde ein Monitor-Teststand eingesetzt, in dem die transversalen elektrischen Felder des Elektronenstrahls durch die TEM-Mode der Felder zwischen der Vakuumkammer mit BPM und einer in dieser coaxial geführten Antenne, die die Position des Elektronenstrahls repräsentiert und transversal verfahrbar ist, simuliert werden. Der Vergleich der für ein einfaches Beispiel, einen zylindrischen Monitor, analytisch bestimmten Signalfunktion mit der numerisch berechneten zeigte ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Man kann somit davon ausgehen, daß die numerische Berechnung der Signalfunktionen mit MAFIA mit hoher Genauigkeit möglich ist.

3.2.2 Signalfunktion einer gaußförmigen transversalen Ladungsverteilung

Wie in Abschnitt 2.2 bemerkt, weist ein *realer* Elektronenstrahl eine gaußförmige transversale Ladungsverteilung auf. Für einen Strahl am Ort (x, y) gilt (für die Flächenladungsdichte in der (x, y) -Ebene):

$$\sigma(x', y') = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{\sigma_x \sigma_y} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - x')^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y - y')^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \quad (3.7)$$

Dabei sind σ_x und σ_y die Standardabweichungen der Gaußverteilung, die mit dem Faktor 2 multipliziert mit der horizontalen und vertikalen Strahlbreite identifiziert werden.

Da die Signalfunktion der Pickup-Elektroden ein nichtlineares Verhalten zeigen, ist anzunehmen, daß Abweichungen zwischen der Signalfunktion (definiert für eine Linienladung) und der Antwort für einen Strahl mit transversaler Ausdehnung festzustellen sind. In Abbildung 3.3 ist die Signalfunktion S_1 des DELTA-BPM zusammen mit einer 2-dimensionalen, gaußförmigen Ladungsverteilung abgebildet.

Aufgrund des Superpositionsgesetzes läßt sich die Antwortfunktion¹ A_i des

¹Der Begriff Signalfunktion soll weiterhin wie in Abschnitt 3.2.1 definiert benutzt werden. Zur Unterscheidung wird daher hier der Begriff Antwortfunktion mit dem Formelzeichen A benutzt.

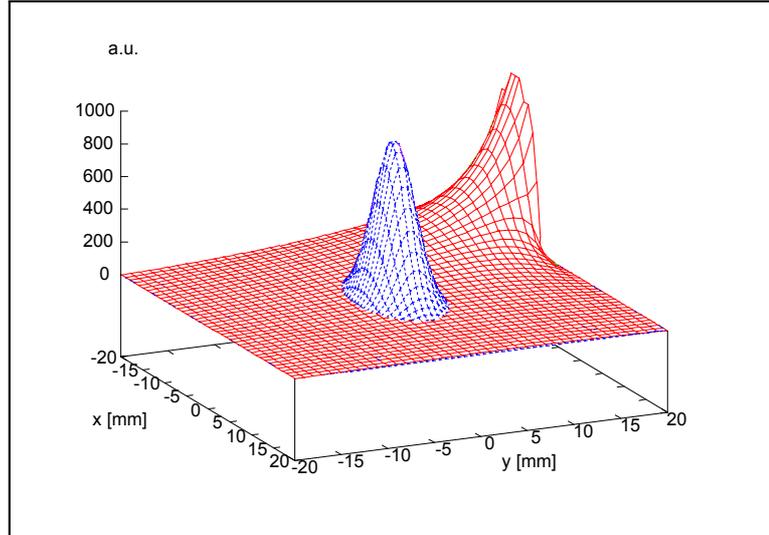


Abbildung 3.3: Dargestellt ist die Signalfunktion S_1 des DELTA-BPM zusammen mit einer 2-dimensionalen gaußförmigen Ladungsverteilung. Zur besseren Darstellung wurden die transversalen Strahldimensionen deutlich größer, als sie in der Realität an DELTA erreicht werden, gewählt.

i -ten Pickup für einen Strahl mit einer Ladungsverteilung gemäß Gleichung 3.7 wie folgt angeben:

$$A_i(x, y, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{q} \iint_{-\infty}^{+\infty} \sigma(x', y') \cdot S_i(x', y') dx' dy' \quad (3.8)$$

Der Faktor $1/q$ steht vor dem Doppelintegral, da sowohl Antwort- als auch Signalfunktion dimensionslos sind und es daher ausreicht, eine auf 1 normierte Dichteverteilung des Teilchenstrahls zu benutzen. Durch numerische Integration des Produkts aus bekannter Signalfunktion S_i und Flächenladungsverteilung $\sigma(x', y')$ lassen sich die Werte der Antwortfunktion für verschiedene σ_x und σ_y bestimmen.

Um eine tiefere Einsicht zu gewinnen, soll hier nun darüber hinausgehend ein analytischer Zusammenhang zwischen der Antwortfunktion A für verschiedene σ und der Signalfunktion S angegeben werden. Der Index i wird nicht weiter mitgeschrieben, da die folgende Rechnung unabhängig von der Position des Pickup im BPM ist.

Dazu wird die Signalfunktion um den Schwerpunkt der Ladungsverteilung in eine Taylor-Reihe entwickelt. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird im weiteren ein Koordinatensystem benutzt, dessen Ursprung ebenfalls am Ort des Schwerpunktes der Ladungsverteilung liegt. In diesem Koordinatensystem (x, y) schreibt sich die Flächenladungsdichte als

$$\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{\sigma_x \sigma_y} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right) \right] \quad (3.9)$$

und die Signalfunktion läßt sich als Taylor-Reihe wie folgt angeben

$$S(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{i,j} \cdot x^i y^j \quad (3.10)$$

Setzt man nun 3.9 und 3.10 in 3.8 ein und sortiert die Summanden und Integrale, so erhält man (die Argumente der Antwortfunktion werden nicht weiter mitgeschrieben, da diese an einem festem Ort für vorgegebene Strahlbreiten berechnet wird)

$$A = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{i,j} \cdot \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} x^i y^j \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right) \right] \quad (3.11)$$

Da die Exponentialfunktion unter dem Integral eine sowohl in x als auch y gerade Funktion ist, wird das Integral zu Null wenn $x^i y^j$ eine ungerade Funktion ist, d.h. wenn gilt $\frac{i+1}{2} \in \mathbb{N} \vee \frac{j+1}{2} \in \mathbb{N}$. Die obige Gleichung läßt sich daher wie folgt umschreiben

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{2i,2j} \cdot \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} x^{2i} y^{2j} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right) \right] \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{2i,2j} \cdot I_{2i,2j} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Mit Hilfe einer Identität für Integrale von Exponentialfunktionen aus [28] läßt sich das Doppel-Integral $I_{2i,2j}$ berechnen, und es ergibt sich

$$I_{2i,2j} = \prod_{m=0}^i |2m-1| \prod_{n=0}^j |2n-1| \cdot \sigma_x^{2i} \sigma_y^{2j} = m_{2i,2j} \cdot \sigma_x^{2i} \sigma_y^{2j} \quad (3.13)$$

Faßt man 3.13 und 3.12 zusammen, so erhält man als erstes Zwischenergebnis eine Darstellung der Antwortfunktion als Polynom in den σ_x und σ_y mit ausschließlich geraden Exponenten und berechenbaren Vorfaktoren

$$A = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{2i,2j} \cdot m_{2i,2j} \cdot \sigma_x^{2i} \sigma_y^{2j} \quad (3.14)$$

Dieses Ergebnis läßt sich weiter vereinfachen, wenn man berücksichtigt, daß die Faktoren $a_{2i,2j}$ die Koeffizienten der Taylor-Entwicklung einer Signalfunktion sind, die die Laplace-Gleichung (Gleichung 3.4) erfüllen muß. Setzt man die Taylor-Entwicklung der Signalfunktion 3.10 in die Laplace-Gleichung ein, so ergibt sich

$$\begin{aligned} \nabla^2 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{i,j} \cdot x^i y^j &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{d^2}{dx^2} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{i,j} \cdot x^i y^j + \frac{d^2}{dy^2} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{i,j} \cdot x^i y^j &= 0 \end{aligned}$$

Führt man die Differentiationen aus, so erhält man durch Koeffizientenvergleich folgende Beziehung für die $a_{i,j}$

$$\begin{aligned} a_{i+2,j}(i+1)(i+2) &= -a_{i,j+2}(j+1)(j+2) \\ \Leftrightarrow a_{i,j} &= -a_{i-2,j+2} \frac{(j+1)(j+2)}{(i-1)i} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Durch Anwendung der Beziehung 3.15 läßt sich die Gültigkeit folgender für die weitere Rechnung wichtige Relation der Koeffizienten per Induktion beweisen

$$\begin{aligned} a_{2i-2j,2j} &= (-1)^j \prod_{k=0}^{j-1} \frac{(2(i-k)-1)(i-k)}{(2k+1)(k+1)} \cdot a_{2i,0} \\ &= k_{2i,2j} \cdot a_{2i,0} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Im nächsten Schritt werden nun die Summanden aus Gleichung 3.14 umsortiert und man kommt zu folgender Darstellung der Antwortfunktion

$$A = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^i a_{2i-2j,2j} \cdot m_{2i-2j,2j} \cdot \sigma_x^{2i-2j} \sigma_y^{2j} \quad (3.17)$$

Unter Verwendung der Beziehung 3.16 kann in obiger Gleichung der nullte Term der inneren Summe explizit ausgeschrieben und dessen Vorfaktor ausgeklammert werden. Man erhält

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=0}^{\infty} \left[a_{2i,0} \cdot m_{2i,0} \left(\sigma_x^{2i} + \sum_{j=1}^i \frac{1}{a_{2i,0}} \frac{1}{m_{2i,0}} k_{2i,2j} \cdot a_{2i,0} \cdot m_{2i-2j,2j} \cdot \sigma_x^{2i-2j} \sigma_y^{2j} \right) \right] \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \left[a_{2i,0} \cdot m_{2i,0} \left(\sigma_x^{2i} + \sum_{j=1}^i \frac{k_{2i,2j} \cdot m_{2i-2j,2j}}{m_{2i,0}} \cdot \sigma_x^{2i-2j} \sigma_y^{2j} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

Die Faktoren der inneren Summanden lassen sich ebenfalls weiter vereinfachen

$$\begin{aligned}
& \frac{k_{2i,2j} \cdot m_{2i-2j,2j}}{m_{2i,0}} \\
&= (-1)^j \prod_{k=0}^{j-1} \frac{(2(i-k)-1)(i-k)}{(2k+1)(k+1)} \cdot \prod_{m=0}^{i-j} |2m-1| \cdot \prod_{n=0}^j |2n-1| \cdot \prod_{o=0}^i \frac{1}{|2o-1|} \\
&= (-1)^j \prod_{k=0}^{j-1} \frac{(2(i-k)-1)(i-k)}{(k+1)} \cdot \prod_{m=i-j+1}^i \frac{1}{|2m-1|} \\
&= (-1)^j \prod_{k=1}^j \frac{(2(i+1-k)-1)(i+1-k)}{k} \cdot \prod_{m=i+1-j}^i \frac{1}{|2m-1|} \\
&= (-1)^j \prod_{k=1}^j \frac{1}{k} \cdot \prod_{n=i+1-j}^i (2n-1)n \cdot \prod_{m=i+1-j}^i \frac{1}{|2m-1|} \\
&= (-1)^j \prod_{k=1}^j \frac{1}{k} \cdot \prod_{n=i+1-j}^i n = (-1)^j \binom{i}{j} \tag{3.19} \\
&= (-1)^j \cdot \text{Binomial-Koeffizient}
\end{aligned}$$

Setzt man dieses Ergebnis in Gleichung 3.18 ein, so erhält man die endgültige Darstellung der Antwortfunktion:

$$\begin{aligned}
A &= \sum_{i=0}^{\infty} \left[a_{2i,0} \cdot m_{2i,0} \left(\sigma_x^{2i} + \sum_{j=0}^i (-1)^j \binom{i}{j} \cdot \sigma_x^{2i-2j} \sigma_y^{2j} \right) \right] \\
&= \sum_{i=0}^{\infty} \left[a_{2i,0} \cdot m_{2i,0} \cdot (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^i \right] \tag{3.20}
\end{aligned}$$

Man erkennt, daß die Antwortfunktion ein Polynom in $(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)$ ist, d.h. die Antwortfunktion eines Pickup nimmt für eine konstante Differenz der Quadrate von horizontaler und vertikaler Strahlbreite gleiche Werte an.

Als Endergebnis soll nun die Antwortfunktion mit Index und Argumenten angegeben werden

$$A_i(x, y, \sigma_x^2 - \sigma_y^2) = S_i(x, y) + \sum_{k=1}^{\infty} \left[a_{2k,0} \cdot m_{2k,0} \cdot (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^k \right] \tag{3.21}$$

$a_{2k,0}$ sind dabei die Koeffizienten der Taylor-Entwicklung, oder anders ausgedrückt die geraden Richtungsableitungen der Signalfunktion S_i um den Punkt (x, y) (der erste Term der Taylor-Entwicklung $a_{0,0}$ ist natürlich die Signalfunktion selbst $a_{0,0} = S_i(x, y)$) und für $m_{2k,0}$ gilt $m_{2k,0} = \prod_{m=0}^k |2m-1|$ (Gleichung 3.13).

Für den DELTA-Strahllagemonitor wurden die Werte der Antwortfunktion von Pickup 1 an verschiedenen Positionen (x, y) durch numerische Integration gemäß Gleichung 3.8 für Strahlbreiten von $\sigma_x, \sigma_y \in \{0mm; 0,25mm; \dots; 3,00mm\}$ bestimmt. Die Integration wurde jeweils über den Bereich von $-4\sigma_x$ bis $+4\sigma_x$ und $-4\sigma_y$ bis $+4\sigma_y$ ausgeführt. Damit wird über 99,994% der Ladungsmenge des Strahls integriert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen für die Positionen $(0mm, 0mm)$, $(-3mm, 3mm)$ und $(-5mm, 5mm)$ sind in Abbildung 3.4 gegen $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ aufgetragen.

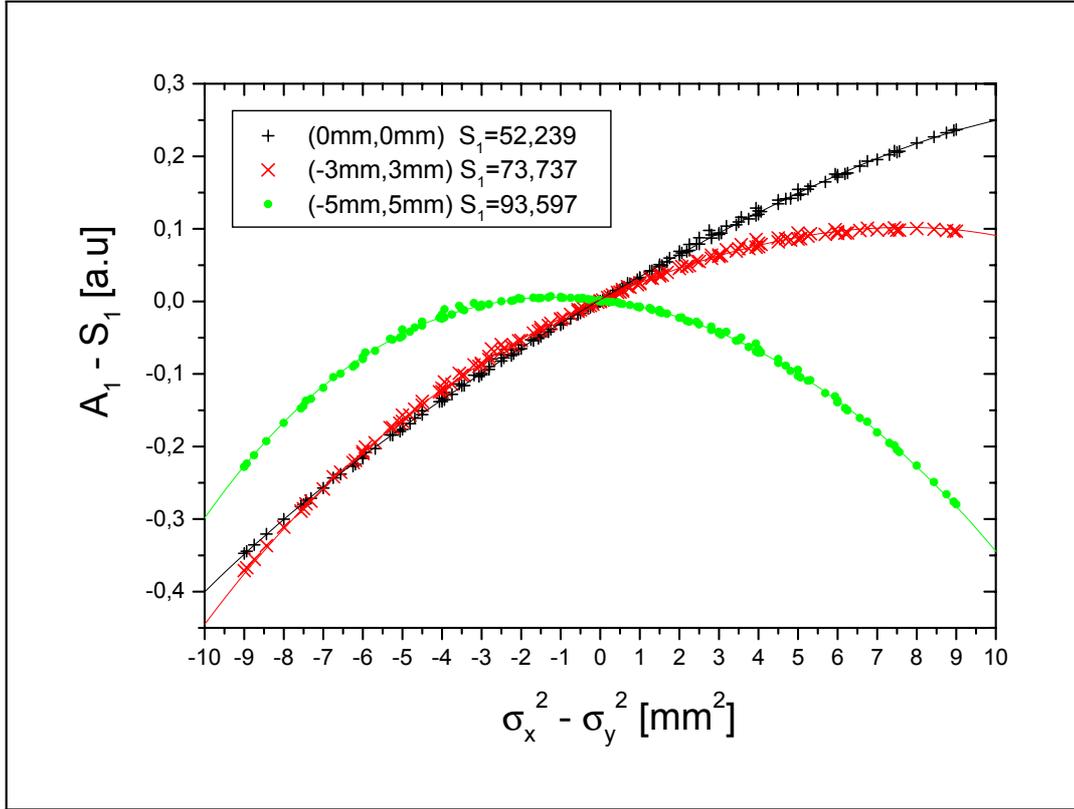


Abbildung 3.4: Dargestellt ist die numerisch berechnete Antwortfunktion (Gleichung 3.8) für Strahlbreiten von $\sigma_x, \sigma_y \in \{0mm; 0,25mm; \dots; 3,00mm\}$ an 3 verschiedenen Positionen im BPM. Die Werte wurden aufgetragen gegen $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$, und um die Darstellung aller drei Kurven in einem Diagramm zu ermöglichen, wurde jeweils der Wert der Signalfunktion von der Antwortfunktion subtrahiert.

Man erkennt an allen drei Punktescharen, an die Polynome 4. Grades angepaßt wurden, deren Graphen ebenfalls in Abbildung 3.4 abgebildet sind, die funktionale Abhängigkeit von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$. Die genaue Darstellung ist von der Strahlage im BPM, d.h. durch die Kurvenform der Signalfunktion und deren Richtungsableitungen an dieser Position, bestimmt.

Weiterhin sieht man, daß für einen runden Strahl mit $\sigma_x = \sigma_y$ die Antwortfunktion gleich der Signalfunktion ist und daher die Messungen nicht beeinflußt

werden. Anders formuliert bedeutet es aber auch, daß unter diesen Bedingung keine Information über die Strahlgröße zu gewinnen ist.

Abschließend bleibt anzumerken, daß für Teilchenstrahlen mit sehr großen Werten von σ_x oder σ_y im Vergleich zu den Dimensionen der Vakuumkammer oder einem Strahl, der sich in der Nähe der Kammerwand befindet, dieser Formalismus seine Gültigkeit verliert. Die Integrationen mit den Grenzen $-\infty, +\infty$ sind dann über den Querschnitt des BPM nicht sinnvoll ausführbar. Als Faustformel läßt sich angeben, daß mindestens 4 Standardabweichungen Abstand in beide Raumrichtungen vorhanden sein sollten, damit durch den Abfall der Ladungsdichte innerhalb der gaußförmigen Verteilung die Berechnung ihre Gültigkeit behält. Für Synchrotronstrahlungsquellen ist diese Forderung erfüllt, da meist horizontal wie vertikal für den typischen Aufenthaltsbereich des Strahls innerhalb der Vakuumkammer > 20 Standardabweichungen zur Verfügung stehen. In anderen Beschleunigeranlagen muß im Einzelfall geprüft werden, ob alle notwendigen Voraussetzungen erfüllt sind.

3.3 Bestimmung der Strahlage

Nachdem gezeigt wurde, wie die Signalfunktionen bestimmt werden können, soll nun beschrieben werden, wie aus den Meßsignalen eines BPM die Strahlage bestimmt werden kann. Dabei wird die transversale Ausdehnung des Teilchenstrahls vernachlässigt und nur mit den Signalfunktionen des BPM gerechnet. In Abschnitt 3.4 wird dann der Einfluß der transversalen Strahldimensionen auf die Strahlagebestimmung untersucht. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, reichen prinzipiell 3 Pickups aus, um die Strahlage und den Strahlstrom eindeutig zu bestimmen. In der Praxis nutzt man jedoch, wenn möglich, die Symmetrie des Strahllagemonitors und benutzt eine dem Querschnitt des Monitors angepaßte Pickup-Geometrie. In Abbildung 4.1 ist der DELTA-BPM abgebildet. Hier werden vier Pickup-Elektroden eingesetzt, die gemäß der Symmetrieachsen des Monitors ebenfalls symmetrisch zum Mittelpunkt des BPMs angeordnet sind. Um nun die Strahlage aus den vier Meßsignalen U_1, \dots, U_4 (Abschnitt 3.1, Gleichung 3.1) des BPMs zu bestimmen, werden verschiedene Summen- und Differenzsignale gebildet und jeweils durch die Summe aller vier Meßsignale dividiert, um auf Werte zwischen -1 und $+1$ normierte Funktionen zu erhalten.

Als der Geometrie des Monitors besonders angepaßt erweisen sich die folgenden 2 Funktionen:

$$\begin{aligned}
 U_x(x, y) &= \frac{(U_2(x, y) + U_4(x, y)) - (U_1(x, y) + U_3(x, y))}{U_1(x, y) + U_2(x, y) + U_3(x, y) + U_4(x, y)} \\
 U_y(x, y) &= \frac{(U_1(x, y) + U_2(x, y)) - (U_3(x, y) + U_4(x, y))}{U_1(x, y) + U_2(x, y) + U_3(x, y) + U_4(x, y)}
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

die auch als elektrische Lagekoordinaten bezeichnet werden. Benutzt man Gleichung 3.1 $U_i(x, y) = k_i(x, y) \cdot S_i(x, y)$ und geht vom idealen BPM aus, bei dem

alle k_i identisch sind $k_i = k$, so erhält man

$$S_x(x, y) = \frac{(S_2(x, y) + S_4(x, y)) - (S_1(x, y) + S_3(x, y))}{S_1(x, y) + S_2(x, y) + S_3(x, y) + S_4(x, y)} \quad (3.23)$$

$$S_y(x, y) = \frac{(S_1(x, y) + S_2(x, y)) - (S_3(x, y) + S_4(x, y))}{S_1(x, y) + S_2(x, y) + S_3(x, y) + S_4(x, y)}$$

In Abbildung 3.5 ist der DELTA-BPM schematisch, zusammen mit den elektrischen Lagekoordinaten, abgebildet. Die Funktionen $S_x(x, y)$ und $S_y(x, y)$ sind durch Isosignallinien, die von $-0,8$ bis $+0,8$ in äquidistanten Schritten von $0,2$ gezeichnet sind, repräsentiert. Man erkennt, daß in der Mitte des Monitors in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen der Strahlage und den Funktionen S_x und S_y besteht, daß für größere Abstände aber der nichtlineare Charakter deutlich hervortritt.

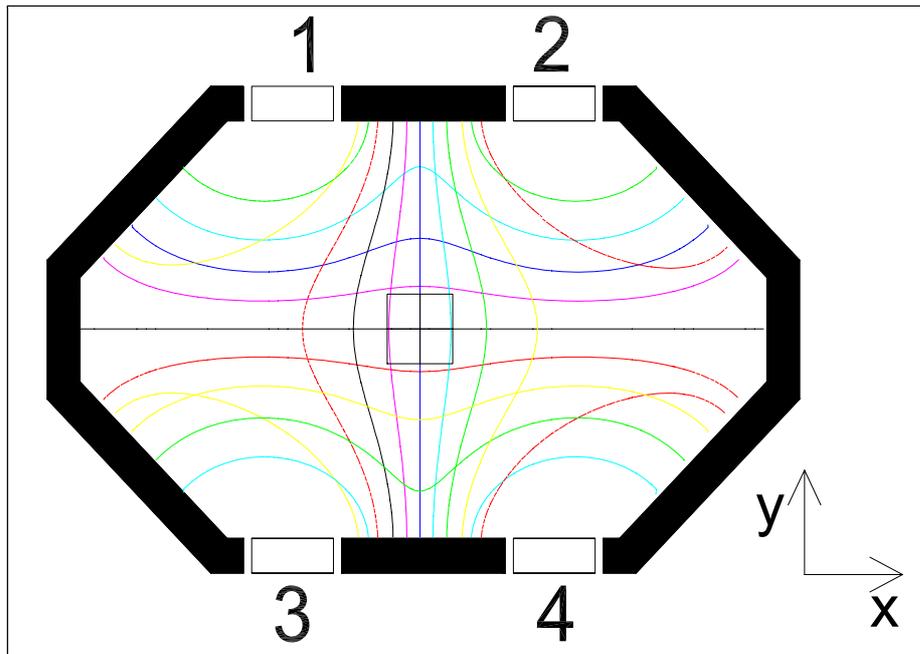


Abbildung 3.5: Schematische Abbildung des DELTA-BPM mit seinen 4 Pickup-Elektroden und den elektrischen Lagekoordinaten S_x und S_y die durch Isosignallinien von $-0,8$ bis $+0,8$ in äquidistanten Schritten von $0,2$ repräsentiert sind. Das Quadrat in der Mitte hat eine Kantenlänge von $10mm$.

Die Strahlage läßt sich über folgende Beziehung bestimmen

$$\begin{aligned}
x &= a_x(x, y) \cdot U_x \\
y &= a_y(x, y) \cdot U_y
\end{aligned}
\tag{3.24}$$

Dabei werden die a_x und a_y als *Monitorkonstanten* bezeichnet. Diese lassen sich unter Berücksichtigung der Gleichungen 3.22 und 3.23 wie folgt aus den Signalfunktionen des idealen BPM bestimmen

$$\begin{aligned}
a_x(x, y) &= \begin{cases} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{S_x(x, y)} & \text{für } x = 0mm \\ \frac{x}{S_x(x, y)} & \text{sonst} \end{cases} \\
a_y(x, y) &= \begin{cases} \lim_{y \rightarrow 0} \frac{y}{S_y(x, y)} & \text{für } y = 0mm \\ \frac{y}{S_y(x, y)} & \text{sonst} \end{cases}
\end{aligned}
\tag{3.25}$$

Da der typische Bereich, in dem sich der Elektronenstrahl während des Routinebetriebs der Speicherringanlage aufhält, $\pm 5mm$ um die Monitormitte beträgt, ist es für viele Anwendungen ausreichend, mit den Monitorkonstanten der Monitormitte zu rechnen und zur Lagebestimmung Gleichung 3.24 zu benutzen. Aus den mit MAFIA für den DELTA-BPM berechneten Signalfunktionen erhält man für diese

$$\begin{aligned}
a_x(0mm, 0mm) &= a_x^0 = 15,9mm \\
a_y(0mm, 0mm) &= a_y^0 = 19,6mm
\end{aligned}
\tag{3.26}$$

In Abbildung 3.6 ist exemplarisch die prozentuale Abweichung von $a_x(x, y)$ bezogen auf a_x^0 für Werte von $x \in \{0, 2mm, \dots, 10mm\}$ und $y \in \{-10mm, -8mm, \dots, +10mm\}$ dargestellt. Im Bereich von $\pm 4mm$ beträgt die Abweichung $< 5\%$, d.h. bei Verwendung der Monitorkonstanten a_x^0 zur Strahl-lagebestimmung beträgt der relative Meßfehler maximal 5% und bei $(x, y) = (-4mm, 2mm)$ beträgt der absolute Meßfehler $130\mu m$. Größere Ablagen von der Monitormitte führen jedoch zu Abweichungen von bis zu 30% und damit verbundenen absoluten Lagemeßfehlern im Bereich von $\approx 1mm$.

Um auch in einem größeren Bereich um die Monitormitte die Strahl-lage mit hoher Präzision bestimmen zu können, wurde folgender Algorithmus zur Strahl-lagebestimmung entwickelt. Voraussetzung zur Durchführung ist, daß die BPMs kalibriert sind (Kapitel 5) und die Werte für $S_x(x, y)$ und $S_y(x, y)$ bzw. $a_x(x, y)$

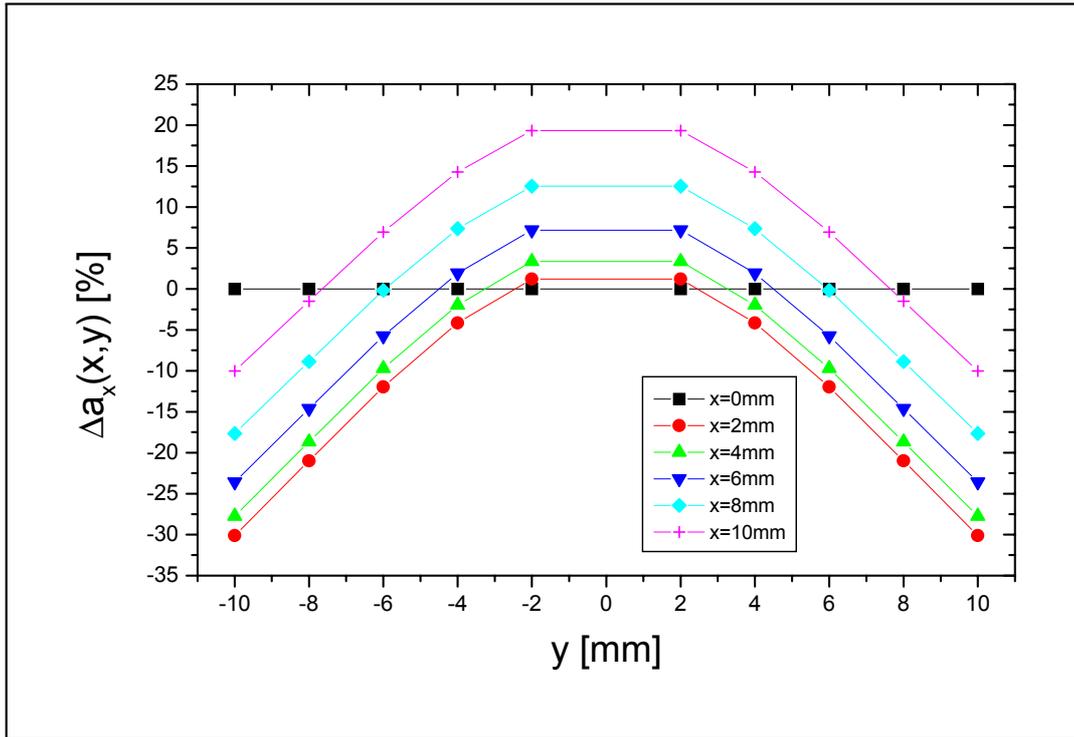


Abbildung 3.6: Prozentuale Abweichung der $a_x(x, y)$ von der Monitorkonstanten a_x^0 der BPM-Mitte für verschiedene Werte der x-Koordinate aufgetragen gegen die y-Koordinate. Aufgrund der x-Achsensymmetrie des Monitors sind nur positive Werte von x dargestellt.

und $a_y(x, y)$ im interessierenden Bereich auf einem für die gewünschte Genauigkeit hinreichend feinen Punktgitter $\{x_g, y_g\}$ bekannt sind.

1. Im ersten Schritt wird aus den gemessenen Werten für U_x und U_y mit Hilfe der für die Monitormitte gültigen Monitorkonstanten a_x^0 und a_y^0 eine erste Näherung der Strahlage bestimmt

$$x^1 = a_x^0 \cdot U_x \quad \text{und} \quad y^1 = a_y^0 \cdot U_y$$

2. Danach wird der zu dem Punkt (x^1, y^1) nächstgelegene Gitterpunkt (x_g^1, y_g^1) gesucht und mittels der für diesen Punkt gültigen Werte $a_x^g(x_g^1, y_g^1)$ und $a_y^g(x_g^1, y_g^1)$ eine neue Näherung für die Strahlage bestimmt

$$x^2 = a_x^g(x_g^1, y_g^1) \cdot U_x \quad \text{und} \quad y^2 = a_y^g(x_g^1, y_g^1) \cdot U_y$$

3. Schritt 2 wird iteriert, bis sich der so bestimmte Gitterpunkt nicht mehr ändert.

4. Im letzten Schritt werden um diesen Gitterpunkt lokal 2 Polynome $P_x(S_x(x, y), S_y(x, y)) = x$ und $P_y(S_x(x, y), S_y(x, y)) = y$ an die Werte der umliegenden Gitterpunkte gefittet und die Strahlage aus

$$x = P_x(U_x, U_y) \quad \text{und} \quad y = P_y(U_x, U_y)$$

bestimmt.

Dieser Algorithmus läßt sich flexibel an die Anforderungen anpassen. Für eine Messung in unmittelbarer Nähe der Monitormitte kann z.B. auf die Iteration verzichtet werden und nur die Polynome bestimmt werden.

Liegen die Daten der für den Monitor bestimmten Werte der S_x und S_y auf einem Gitter mit $0,5mm$ Abstand im Bereich von $\pm 10mm$ um die Monitormitte vor, so zeigen Simulationen, daß im gesamten Bereich eine theoretische absolute Genauigkeit von $< 2\mu m$ zu erreichen ist und eine relative Auflösung, die 0.02% der zu detektierenden Strahlbewegung beträgt, d.h. in der Regel wesentlich kleiner als $1\mu m$ ist.

Diese Genauigkeiten gelten in der Theorie für einen Monitor, dessen Signalfunktionen mit beliebiger Genauigkeit bekannt sind, d.h. es handelt sich um die mit diesem Algorithmus maximal zu erreichende absolute Genauigkeit. Für einen *realen* BPM ist die Genauigkeit durch die Kalibration des BPM sowie durch das Auflösungsvermögen der Meßelektronik bestimmt.

3.4 Einfluß des Strahlquerschnitts auf die Strahlage-Bestimmung

Hier wird nun der Einfluß der transversalen Strahldimensionen auf die Strahlagemessung untersucht, indem die virtuelle Strahlverschiebung berechnet wird, die ein Strahl abhängig von Strahlbreite σ_x und -höhe σ_y erfährt, wenn für die Strahlagebestimmung die Signalfunktionen benutzt werden. Dieses Vorgehen wird gerechtfertigt durch die Tatsache, daß bisher an allen Beschleunigeranlagen die Strahlageberechnung auf den Signalfunktionen basiert und somit die transversalen Strahldimensionen bei der Bestimmung der Strahlposition ignoriert werden.

Dazu wurden für verschiedene Strahlagen die Antwortfunktionen $A_1(x, y, \sigma_x, \sigma_y), \dots, A_4(x, y, \sigma_x, \sigma_y)$ für einen Strahl mit gaußförmiger Ladungsverteilung für Standardabweichungen von $\sigma_x, \sigma_y \in \{0; 0,25mm; \dots; 3,0mm\}$ gemäß der Gleichung 3.8 berechnet. Das Doppelintegral aus 3.8 wurde numerisch auf einem Punktgitter, für das die Werte der Signalfunktionen $S_1(x, y), \dots, S_4(x, y)$ mittels MAFIA berechnet wurden, im Bereich von $\pm 4 \cdot \sigma_x$ und $\pm 4 \cdot \sigma_y$ (entspricht $99,994\%$ der Ladungsverteilung), ausgewertet. Aus den so bestimmten Antwortfunktionen sind analog zu Gleichung 3.22 Werte für die elektrischen Lagekoordinaten $A_x(x, y, \sigma_x, \sigma_y)$ und $A_y(x, y, \sigma_x, \sigma_y)$ für Strahlen mit transversaler Ladungsverteilung berechnet worden. Diese wurden an den Strahlagebestimmungsalgorithmus übergeben, der auf den Signalfunktionen S_x

und S_y des BPM, d.h. auf einem linienförmigen Strahl, basiert. Die so berechneten Strahlpositionen wurden zusammen mit den vorgegebenen Strahlpositionen abgespeichert und einer systematischen Auswertung in Abhängigkeit der wahren Strahlposition und der transversalen Strahldimensionen zugänglich gemacht.

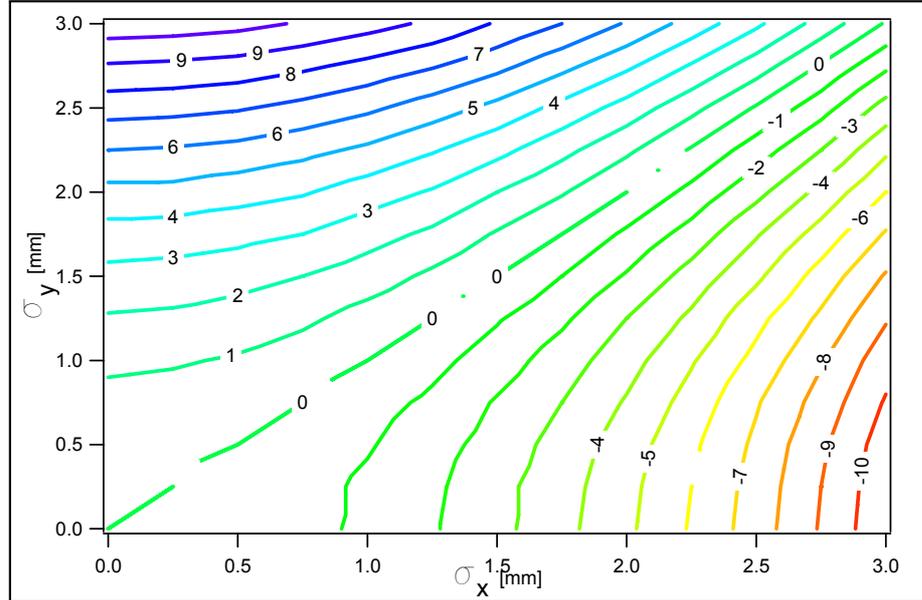


Abbildung 3.7: Lagemeßfehler in horizontaler Richtung in μm für einen Strahl an der Position $(0, 25mm, 0, 25mm)$, aufgetragen als Isolinien für verschiedene Werte von σ_x und σ_y , wenn die Strahlageberechnung auf den Signalfunktionen, d.h. einem linienförmigen Strahl, beruht.

In Abbildung 3.7 ist das Ergebnis der Berechnung des Meßfehlers (aufgetragen in μm) in x -Richtung für eine Strahlposition nahe der Mitte $(0, 25mm, 0, 25mm)$ des DELTA-BPM² abgebildet. Für die y -Richtung erhält man identische Ergebnisse, lediglich das Vorzeichen des Lagemeßfehlers ändert sich. Man erkennt, daß für Strahlbreiten im Bereich von $\sigma_x, \sigma_y \in \{0mm; \dots; 1mm\}$ der Meßfehler im Bereich von $< 1,5\mu m$ liegt. Lediglich für Strahlen mit einem großem Aspektverhältnis³, d.h. $\sigma_x/\sigma_y \gg 1$ oder $\ll 1$ und Werten der Strahlbreite bzw. -höhe von $3mm$ ergeben sich Lagemeßfehler von $> 10\mu m$. Außerdem erkennt man, wie in Abschnitt 3.2 vorausgesagt, daß für runde Strahlen ($\sigma_x = \sigma_y$) der Fehler verschwindet. Weiter ist zu bemerken, daß der Lagemeßfehler in x -Richtung bei

²Aufgrund der Symmetrie des DELTA-BPM und der Definition der elektrischen Lagekoordinaten (Gleichung 3.22) verschwindet der Meßfehler in der Mitte des Monitors unabhängig von der Wahl von σ_x und σ_y .

³Flache, horizontal breite Strahlen bzw. schmale, vertikal hohe Strahlen wie sie insbesondere in Quadrupolmagneten vorliegen, da dort die Betafunktion der fokussierenden Ebene wesentlich größer ist als die der defokussierenden Ebene.

Vertauschen der Werte von σ_x und σ_y betragsmäßig gleich bleibt, lediglich das Vorzeichen wechselt.

Diese Rechnung wurde für die Strahlposition $(3\text{mm}, 3\text{mm})$ wiederholt; das Ergebnis ist in Abbildung 3.8 zu sehen. Der horizontale Meßfehler ist nun um einen Faktor von ca. 10 größer. Für Standardabweichungen kleiner 1mm liegt er unter $10\mu\text{m}$, bei größeren Werten werden jedoch Fehler von mehr als $100\mu\text{m}$ erreicht.

Abschließend wurde der Meßfehler für zwei verschiedene transversale Ladungsverteilungen für einen Bereich des Monitors von $\{\pm 10\text{mm}, \pm 10\text{mm}\}$ um die Mitte berechnet. Um die Darstellung zu vereinfachen, wurde jeweils der absolute Meßfehler als Wurzel aus der Summe der Quadrate des Meßfehlers in x - und y -Richtung $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ dargestellt. In Abbildung 3.9 ist dieser für Strahldimensionen von $\sigma_x = 0,5\text{mm}$ und $\sigma_y = 0,05\text{mm}$ abgebildet, wie sie typischerweise in 3.Generation SR-Quellen (Abschnitt 2.2) als obere Grenze vorkommen.

Man erkennt, daß der maximale Fehler im ganzen Bereich von $\pm 10\text{mm}$ um die Monitormitte $< 15\mu\text{m}$ und für den Bereich von $\pm 4\text{mm}$ kleiner $5\mu\text{m}$ ist. Der daraus resultierende absolute Meßfehler ist somit um eine Größenordnung kleiner als in Kapitel 2 gefordert wurde, um die optimale vertikale Emittanz zu erzielen und die Strahlage für den Betrieb der Synchrotronstrahlungsbeamlines zu reproduzieren. Der Einfluß auf die absolute Strahllagemessung kann daher vernachlässigt werden. Da im Betrieb der Beschleunigeranlage die Emittanz und damit die Strahlbreite konstant ist, wird die relative Auflösung durch die Nicht-

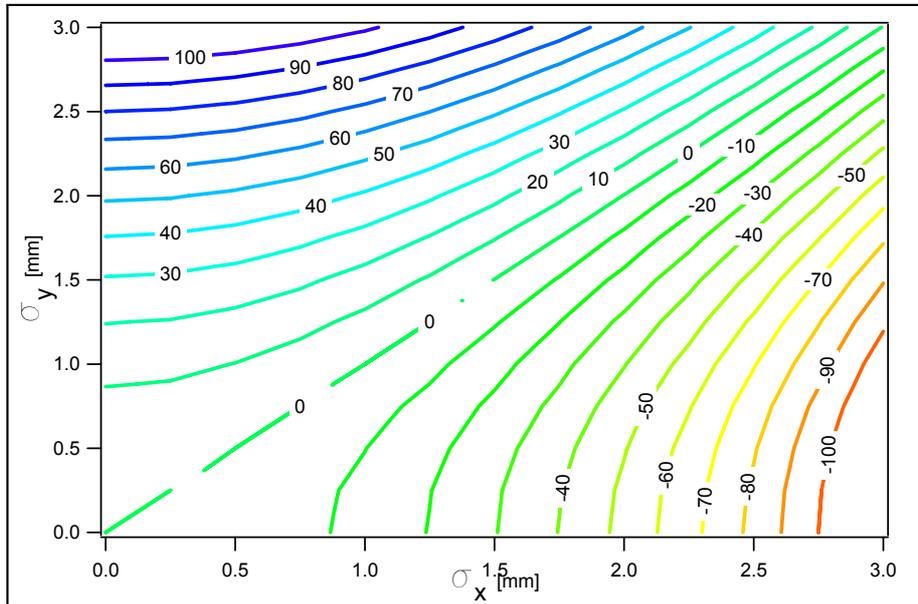


Abbildung 3.8: Lagemeßfehler in horizontaler Richtung in μm für einen Strahl an der Position $(3\text{mm}, 3\text{mm})$, aufgetragen als Isolinien für verschiedene Werte von σ_x und σ_y , wenn die Strahlageberechnung auf den Signalfunktionen, d.h. einem linienförmigen Strahl, beruht.

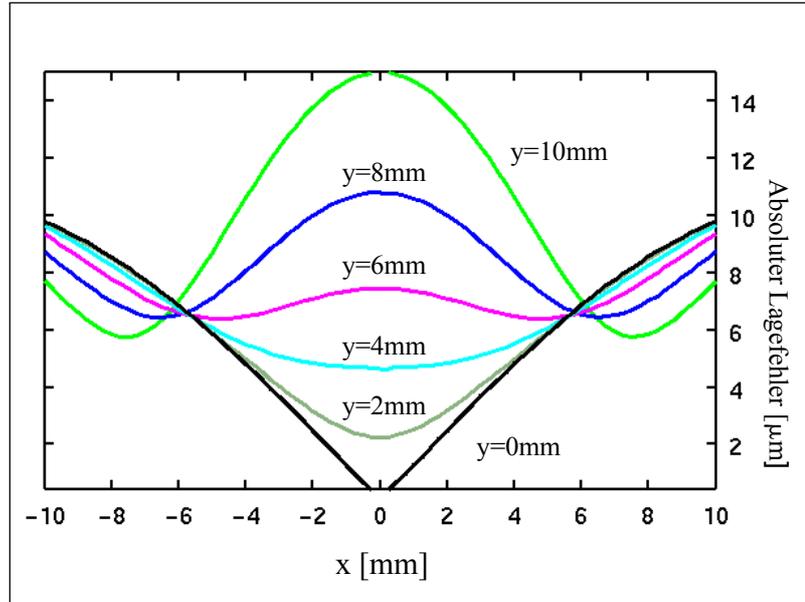


Abbildung 3.9: Dargestellt ist der absolute Meßfehler für einen Strahl mit $\sigma_x = 0,5\text{mm}$ und $\sigma_y = 0,05\text{mm}$ als Isolinien im Bereich von horizontal $\pm 10\text{mm}$ und vertikal $\{0\text{mm}; 2\text{mm}; \dots; 10\text{mm}\}$, wie er entsteht, wenn die Strahlageberechnung auf den Signalfunktionen, d.h. einem linienförmigen Strahl, beruht.

berücksichtigung der Strahlbreite ebenfalls nicht beeinflusst.

Kommt es jedoch zu transversalen Schwingungen des Elektronenstrahls, deren Schwingungsperiode kürzer ist als die Integrations- bzw. Mittelungszeit der eingesetzten Meßelektronik, so kann es auch an 3. Generation SR-Quellen, zu einer indirekten Beeinflussung des Betriebs kommen. Der Elektronenstrahl erscheint in diesem Fall durch die Mittelung transversal aufgeweitet; dies um so stärker je größer die Schwingungsamplitude ist. In Abbildung 3.10 ist als Beispiel das über eine Schwingungsperiode gemittelte Ladungsprofil einer gaußförmigen Ladungsverteilung mit einer Varianz von σ abgebildet, die mit einer Amplitude von $2,5 \cdot \sigma$ bzw. $5 \cdot \sigma$ eine sinusförmige Schwingung ausführt. Man erkennt deutlich, wie dies zu einer virtuellen Aufweitung des Strahls führt, welche durch die Mittelung über die Signalfunktionen zu einer scheinbaren Verschiebung des Ladungsschwerpunktes führt. Ist die Schwingungsamplitude der Strahlbewegung zeitabhängig, scheint es, als ob der Ladungsschwerpunkt in Bewegung ist. Bei einer relativen Auflösung des Orbitkorrektursystems von einigen μm (Abschnitt 2.3.1 und [7]) kann es zu einer Rückwirkung auf den Strahl kommen, die den Betrieb der Anlage stört, selbst wenn die Schwingungsamplitude klein ist.

Mögliche Gründe für transversale Strahlbewegungen können u.a. sein

- Wechselstromanteile die auf den Gleichstrom eines Netzgerätes zur Magnetversorgung aufgeprägt sind (Netzgeräte-Ripple). Typischerweise ist dieser Ripple kleiner 10^{-5} des Sollwertes. Im Fehlerfall des Netzgerätes kann dieser

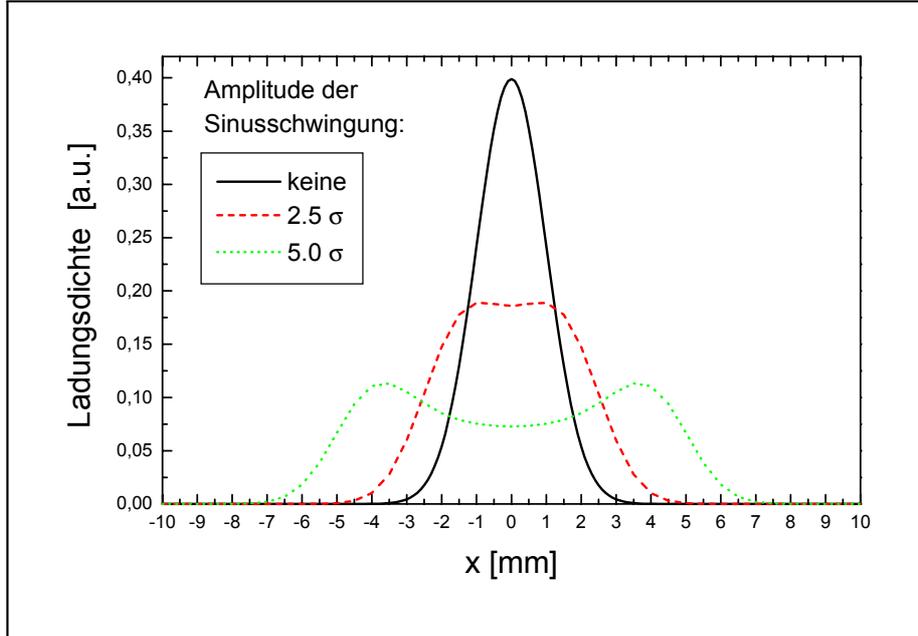


Abbildung 3.10: Abgebildet ist das über eine Periode einer sinusförmigen Schwingung gemittelte Ladungsprofil einer gaußförmigen Ladungsverteilung mit der Varianz σ für Schwingungsamplituden von $2, 5 \cdot \sigma$ und $5 \cdot \sigma$.

größer werden und zeitlich veränderlich sein.

- Zur Durchführung der für den Beschleunigerbetrieb essentiellen Messung des Q-Wertes (Gleichung 2.3) muß der Strahl transversal angeregt werden. Die Anregungsamplitude ist normalerweise sehr klein, bei einer hinreichenden Auflösung des Orbit-Meßsystems kann es trotzdem zu einer Beeinflussung kommen.

Ob jedoch in der Tat der Betrieb gestört wird, hängt von vielen Parametern ab und ergibt sich im Einzelfall. Die mögliche Beeinflussung wird aber in jedem Fall zu einer maximalen Orbitstörung von einigen μm führen.

In Abbildung 3.11 ist das Ergebnis der Lagefehlerberechnung für einen Strahl mit den Dimensionen $\sigma_x = 3,0mm$ und $\sigma_y = 0,25mm$ abgebildet. Strahlen mit solchen Dimensionen treten an der Beschleunigeranlage DAΦNE in Frascati, Italien [29] auf. Bei dieser Anlage handelt es sich um eine sogenannte Φ -Factory, in der Elektronen und Positronen in 2 gegenläufigen Speicherringen bei einer Energie von $0,51GeV$ gespeichert werden, um in 2 Wechselwirkungspunkten zur Kollision gebracht zu werden. DAΦNE dient, wie auch zwei weitere zur Zeit in Betrieb gehende Beschleunigeranlagen [30] [31], der Untersuchung der CP-Verletzung. Die außerordentlich breiten Strahlen mit großem Aspektverhältnis sind notwendig, um eine hohe Wechselwirkungsrate zu erzielen und gleichzeitig die beschleunigerphysikalische Beeinflussung der beiden Strahlen im Wechselwirkungspunkt zu minimieren.

Man erkennt, daß in diesem Fall der absolute Meßfehler im Arbeitsbereich des Beschleunigers bis zu einigen $100\mu m$ betragen kann und daß plötzliche Veränderungen der Strahlbreite zu einem in Einheiten der vertikalen Strahlgröße großen relativen Meßfehler führen. Um die notwendige hohe Wechselwirkungsrate zu erzielen, ist es notwendig, die beiden Teilchenstrahlen mit hoher Präzision, insbesondere bzgl. der vertikalen Position, in den Wechselwirkungspunkten aufeinander zu lenken. Dabei kann es zum sogenannten Beam-Blow-Up, d.h. einer Vergrößerung der transversalen Strahldimensionen, kommen. Diese wiederum führt dann zur Detektion einer virtuellen Strahlverschiebung, die Einfluß auf die globale Orbitkorrektur der Beschleunigeranlage hat und die beiden Teilchenstrahlen bei den Korrekturversuchen aus der Kollisionszone führen kann. Da dadurch wiederum der Beam-Blow-Up-Effekt vermindert wird, ändern sich die Strahldimensionen erneut, und es kann zu einer Rückkopplung kommen, die den Beschleunigerbetrieb stört, insbesondere wenn der Einfluß der strahlbreitenabhängigen Lagemeßfehler nicht berücksichtigt wird.

Um den Einfluß von sich verändernden Strahldimensionen auf die Lagemesung an einer Beschleunigeranlage zu untersuchen, wurde an DELTA folgender Versuch durchgeführt: Da der Effekt mit wachsendem Abstand des Elektronenstrahls von der Monitormitte zunimmt, wurde der Elektronenstrahl innerhalb eines ausgewählten BPM mittels einer 4er-Beule auf eine Off-Orbit-Position bei ca. $(2,8mm, 2,6mm)$ gesteuert. Die Anregungsamplitude des für die Q-Wert-

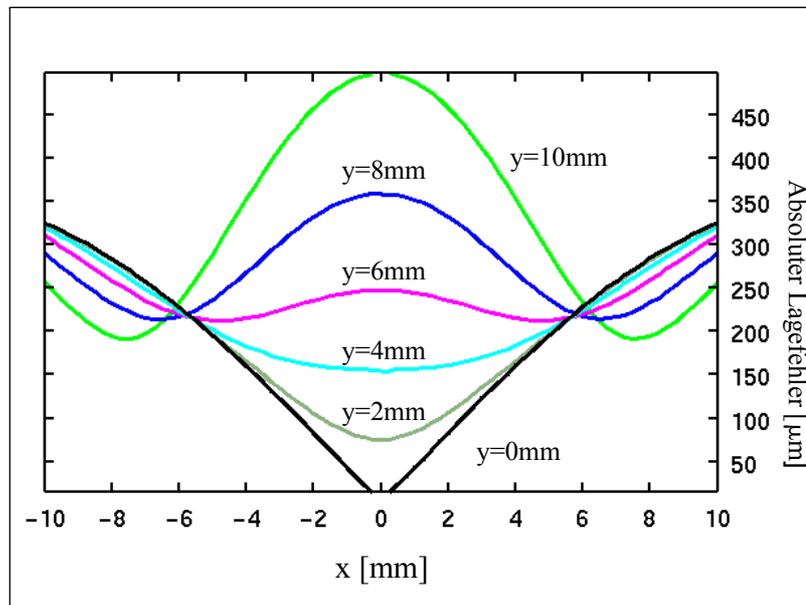


Abbildung 3.11: Dargestellt ist der absolute Meßfehler für einen Strahl mit $\sigma_x = 3mm$ und $\sigma_y = 0,25mm$ als Isolinien im Bereich von horizontal $\pm 10mm$ und vertikal $\{0mm; 2mm; \dots; 10mm\}$, wie er entsteht, wenn die Strahlageberechnung auf den Signalfunktionen, d.h. einem linienförmigen Strahl, beruht.

Messung [32] eingesetzten Anregungskickers⁴ wurde auf einen konstanten Wert eingestellt, der so bemessen wurde, daß selbst im Fall der resonanten Strahlanregung kein Strahlverlust zu beobachten ist. Während der ganzen Meßzeit wurde permanent die Strahllage an diesen BPMs im Abstand von 1s aufgezeichnet. Die Anregungsfrequenz wurde alle 15s so eingestellt, daß der Strahl vertikal resonant angeregt wurde oder die Frequenz 100kHz daneben lag. Durch diese Vorgehensweise wurde ausgeschlossen, daß ein möglicherweise durch den Anregungskicker auf den Strahl übertragenes DC-Signal zu der beobachteten Orbitverschiebung führt.

Bei einer Frequenz, die der Anregungsfrequenz eines Q-Wertes entspricht, kommt es zu einer resonanten Anregung des Elektronenstrahls, die zu einer transversalen Aufweitung in der entsprechenden Ebene führt. Da das Anregungssystem nicht kalibriert, d.h. der Zusammenhang zwischen Anregungsamplitude und Kickwinkel nicht bekannt ist, kann keine Aussage über den absoluten Wert der Strahlanregung getroffen werden. Eine Abschätzung durch Analyse des auf dem Synchrotronlicht-Monitor beobachteten Strahlquerschnitts ohne und mit Anregung läßt auf eine Schwingungsamplitude von $1\text{mm} - 3\text{mm}$ schließen. In Abbildung 3.12 ist das Ergebnis dieser Messung für eine Anregung in der vertikalen Ebene dargestellt.

Durch die erzwungene Aufweitung des Strahls verschiebt sich der Ladungsschwerpunkt des Elektronenstrahls in der horizontalen Ebene um ca. $+50\mu\text{m}$ und in der vertikalen Ebene um ca. $-50\mu\text{m}$. Für einen Strahl an der Position $(+3\text{mm}, +3\text{mm})$ war zu Beginn des Abschnitts vorausgesagt worden, daß eine vertikale Aufweitung in x -Richtung zu einem positiven und in y -Richtung zu einem negativen Lagemeßfehler gleichen Betrages führt. Der Betrag von $50\mu\text{m}$ korrespondiert zu einer vertikalen Aufweitung von 2mm , was ebenfalls im Bereich der für diese Messung gültigen Abschätzung liegt.

Es ist somit möglich, einen Lagemeßfehler aufgrund einer Veränderung des Strahlquerschnitts zu beobachten. Die gemessenen Werte dieses Fehlers entsprechen den theoretischen Voraussagen. Berücksichtigt man, daß Auflösungen im Bereich von μm und darunter für die Orbitmessung und Korrektur angestrebt bzw. erreicht werden, so ist klar, daß hier ein Effekt beschrieben wurde, dem in Zukunft stärkere Beachtung bei der Analyse von Strahllagemonitor-Signalen gewidmet werden sollte.

3.5 Emittanz-Messung mittels Pickup-Strahllagemonitore

In diesem Abschnitt soll auf die Ergebnisse von Abschnitt 3.2.2 zurückgegriffen werden. In diesem wurde gezeigt, daß die Antwortfunktion eines kapazitiven

⁴Hierbei handelt es sich um einen Luftspulenmagnet, der ausgestattet mit einer entsprechenden Leistungselektronik, den Strahl mit Frequenzen von einigen kHz bis zu 2MHz , zum Zweck der Q-Wert-Messung, sinusförmig anregen kann.

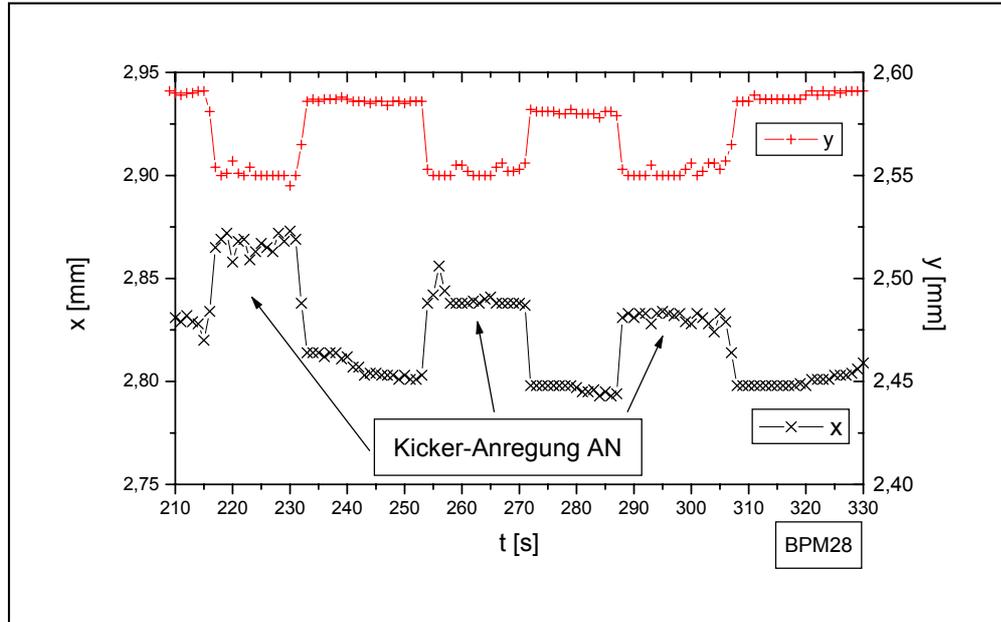


Abbildung 3.12: Virtuelle Verschiebung des Ladungsschwerpunktes des in DELTA gespeicherten Elektronenstrahls durch Aufweitung des Strahls mittels Anregung mit der Anregungsfrequenz des vertikalen Q -Wertes. Die absolute Verschiebung beträgt in beiden Ebenen bis zu $50\mu m$ (gemessen an BPM28).

Pickup eine Funktion von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ ist. Betrachtet man weiterhin Abbildung 3.4, so erkennt man, daß sich die Antwortfunktion in der Mitte des Monitors für verschiedene Kombinationen von Strahlbreite und -höhe bis $3mm$ um ca. 0.7% ändert. Diese relative Veränderung des Meßsignals ist um Größenordnungen größer als das Auflösungsvermögen moderner Strahllagemesssysteme, daher liegt es nahe, zu untersuchen, ob dieser Effekt für die Messung der Strahldimensionen und damit ggf. auch der Emittanzen eines Beschleunigers geeignet ist.

In Anhang A wird ein Konzept, basierend auf BPMs mit elektrostatischen Pickup-Elektroden, vorgestellt und die technischen Voraussetzungen und Anforderungen an die Realisierung diskutiert. Hier soll vorausgesetzt werden, daß es möglich ist, mittels eines solchen Monitors den Wert für $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ zu bestimmen, und gezeigt werden, wie daraus die Emittanzen berechnet werden können. Im weiteren wird für die Differenz der Summe der Quadrate der Standardabweichungen die folgende Abkürzung benutzt:

$$\Delta\sigma = \sigma_x^2 - \sigma_y^2 \tag{3.27}$$

$$\Delta\sigma \stackrel{\text{Gl. 2.4}}{=} \varepsilon_x \cdot \beta_x - \varepsilon_y \cdot \beta_y$$

Es ist offensichtlich, daß zur unabhängigen Bestimmung von ε_x und ε_y zwei Messungen von $\Delta\sigma$ an Positionen mit geeigneten Monitoren und unterschiedlichen Werten der Betafunktionen notwendig sind. Bezeichnet man diese Positionen durch die Indizes 1 und 2, so erhält man folgendes Gleichungssystem

$$\begin{aligned}\varepsilon_x \cdot \beta_x^1 - \varepsilon_y \cdot \beta_y^1 &= \Delta\sigma^1 \\ \varepsilon_x \cdot \beta_x^2 - \varepsilon_y \cdot \beta_y^2 &= \Delta\sigma^2\end{aligned}\tag{3.28}$$

welches sich bei geeigneter Wahl der Betafunktionen nach ε_x und ε_y auflösen läßt. Faßt man das Ergebnis zusammen, so erhält man für die Emittanzen:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\Delta\sigma^2 \cdot \beta_y^1 - \Delta\sigma^1 \cdot \beta_y^2}{\beta_x^2 \cdot \beta_y^1 - \beta_y^2 \cdot \beta_x^1} \\ \varepsilon_y &= \frac{\Delta\sigma^2 \cdot \beta_x^1 - \Delta\sigma^1 \cdot \beta_x^2}{\beta_x^2 \cdot \beta_y^1 - \beta_y^2 \cdot \beta_x^1}\end{aligned}\tag{3.29}$$

Die Bedingung an die Betafunktionen ergibt sich aus der Forderung nach einem von Null verschiedenen Nenner der beiden Lösungen zu $\beta_x^2 \cdot \beta_y^1 \neq \beta_y^2 \cdot \beta_x^1$.

Unter bestimmten Bedingungen kann eine der Emittanzen auch aus einer einzelnen Messung mit hinreichender Genauigkeit gewonnen werden. Dazu wird mit Hilfe von Gleichung 2.7 die 2. Gleichung aus 3.27 folgendermaßen umgeformt:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma &= \sigma_x^2 - \sigma_y^2 \\ &= \varepsilon_x \cdot \beta_x - k \cdot \varepsilon_x \cdot \beta_y \\ &= \varepsilon_x \cdot \beta_x \cdot \left(1 - k \frac{\beta_y}{\beta_x}\right)\end{aligned}$$

Man erhält für die horizontale Emittanz

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\left(1 - k \frac{\beta_y}{\beta_x}\right)} \cdot \frac{\Delta\sigma}{\beta_x}\tag{3.30}$$

Wenn $k \cdot \beta_y / \beta_x \ll 1$ gilt, so ist in diesem Fall eine Bestimmung der horizontalen Emittanz aus einer einzelnen Messung möglich. Es muß dann entweder die Kopplung k sehr klein oder die vertikale Betafunktion am Ort der Messung deutlich kleiner als die horizontale sein.

Man sieht, daß auf diese Weise eine Bestimmung der Emittanzen prinzipiell möglich ist, wenn alle meßtechnischen Probleme gelöst sind. Allerdings handelt es sich um eine aufwendige Meßmethode, der an Elektronenspeicherringen keine große Bedeutung beizumessen ist, da hier die Strahlquerschnitte sehr klein

sind und dementsprechend die Meßgenauigkeit für $\Delta\sigma$ außerordentlich hoch sein muß. Außerdem steht an diesen die zerstörungsfreie Meßmöglichkeit der Emittanzen mittels Synchrotronstrahlung zur Verfügung, welche im Vergleich zu der vorgeschlagenen Meßmethode wesentlich direkter ist.

Eine Meßmöglichkeit mittels Pickup-Strahllagemonitoren könnte allerdings an Protonen- und Ionenbeschleunigern sinnvoll eingesetzt werden. Die an diesen erzeugte Synchrotronstrahlung ist so gering, daß eine Messung der Strahlquerschnitte so nicht möglich ist. Alle anderen Meßmethoden mit Wire-Scannern oder Restgasionisation sind strahlstörend und beeinflussen den Beschleunigerbetrieb. Eine permanente Messung der transversalen Strahldimensionen ist somit, zumindest an Speicherringen, nicht möglich. Andererseits ist eine Kontrolle des Strahlquerschnitts für den Betrieb eines Beschleunigers wie LHC [1] essentiell, so daß hier für die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Meßmethode auch eine aufwendige Meßapparatur in Kauf genommen werden kann. In Anhang A wird auf das Konzept für einen solchen Monitor detaillierter eingegangen.

Kapitel 4

Das

DELTA-Strahllagemeißsystem

Nachdem in den vorherigen Kapiteln ausführlich die Aufgaben des Strahllagemeißsystems beschrieben, die Anforderungen an das System evaluiert und die Theorie der Strahllagemessung dargelegt wurde, soll nun die Realisierung des DELTA-Strahllagemeißsystems beschrieben werden. Der Aufbau der Strahllagemonitore sowie die Installation im Speicherring, die eingesetzte Meßelektronik und deren Anbindung an das Kontrollsystem werden vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Leistungsdaten des Meißsystems.

4.1 Strahllagemonitor

In Abbildung 4.1 ist ein Querschnitt durch den DELTA-BPM in der Ebene der Pickup-Elektroden dargestellt. Um eine glatte Vakuumkammer mit möglichst wenigen Änderungen des Querschnitts zu erhalten, wurde das Profil der Vakuumkammer auch in den Strahllagemonitoren beibehalten. Dieses Design führt zu einer sehr geringen Breitband-Impedanz der Vakuumkammer, welche die Voraussetzung zur Erzielung kurzer Bunchlängen und damit verbundenen hohen Spitzenströmen ist. Auf der Innenseite des Speicherrings befindet sich die sogenannte Pumpkammer. In dieser sind integrierte Vakuum-Pumpen¹ installiert, die zur Erreichung des für den Speicherringbetrieb notwendigen Ultrahochvakuums im Bereich von $< 10^{-9} Pa$ benötigt werden. Diese Pumpkammer ist durch einen $8mm$ hohen und $35mm$ tiefen Pumpkanal mit der achteckigen Strahlkammer verbunden.

Um zu vermeiden, daß Synchrotronstrahlung auf die Pickup-Elektroden trifft und diese aufheizt, sind die 4 Elektroden symmetrisch zur Monitormitte in die Ober- und Unterseite des BPM eingesetzt. In der Ebene der Pickup ist die Monitorwandung verstärkt, um eine Verformung des BPM durch die Evakuierung des

¹Bei diesen handelt es sich um kombinierte Module aus verteilten Ionen-Pumpen und NEG-Streifen-Pumpen [33].

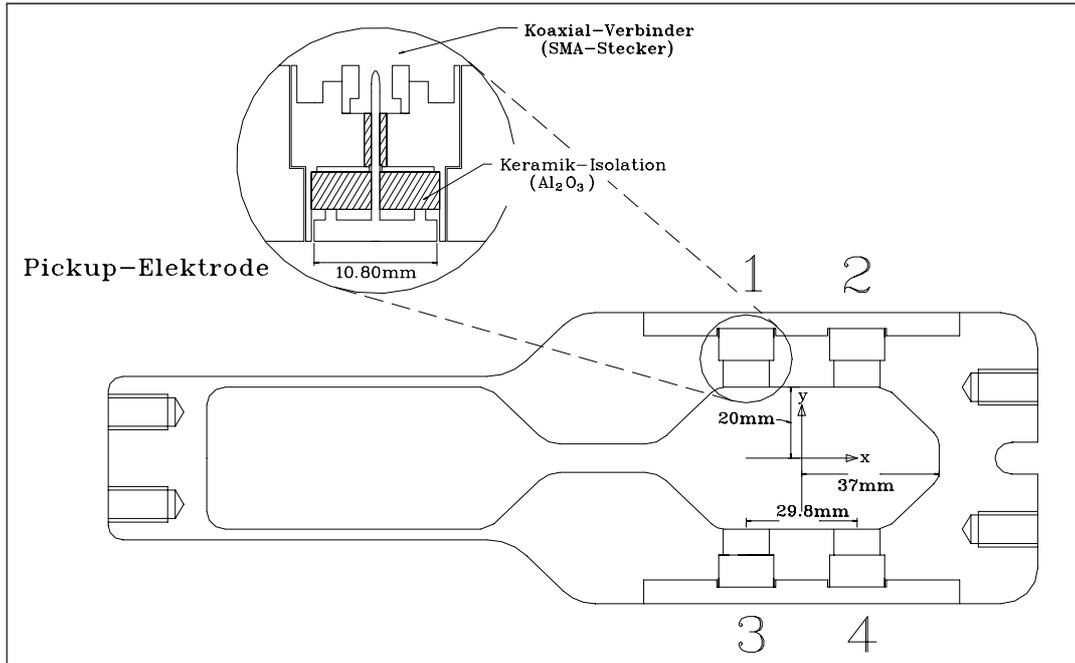


Abbildung 4.1: Querschnitt durch den DELTA-Strahllagemonitor in der Ebene der Pickup-Elektroden. Einer der Pickup ist in der Zeichnung vergrößert dargestellt. Die positive x -Achse zeigt zur Außenseite des Rings, die y -Achse nach oben.

Vakuumsystems zu vermeiden. Alle an DELTA eingesetzten BPMs sind, bis auf eine Abweichung in der äußeren Kontur, auf die noch eingegangen wird, identisch. Die Außenkontur und die Aufnahmen für die Pickup-Elektroden wurden auf einer numerisch gesteuerten CNC-Fräse, die innere Kontur mittels eines Drahterosionsverfahrens, aus nichtmagnetischem Edelstahl (Bezeichnung: sst 1.4429) gefertigt. Diese Verfahren gewährleisten die hohe Genauigkeit und gute Reproduzierbarkeit von $\approx 30\mu\text{m}$ in der Serienfertigung der Monitore.

Die eingesetzten Pickup-Elektroden wurden für die ESRF² (Referenz: ESRF-85.50.0056C) entwickelt und für den DELTA-Strahllagemonitor übernommen. Die Meßelektrode ist in eine Metallhülse eingesetzt und mittels einer Keramik, die auch die Vakuumentauglichkeit garantiert, gegen diese isoliert. Zur Installation in den BPM wird die Elektrode in ihre Aufnahme eingesetzt und am oberen Kragen mit dem BPM vakuumdicht verschweißt. Eine Stufe in der Elektrode und der Aufnahme des BPM soll für einen paßgenauen Sitz der Elektrode, insbesondere den planen Abschluß mit der Monitorwand, sorgen. Beim Design der Elektroden wurde versucht eine möglichst gute Anpassung der Elektrode an die 50Ω -Impedanz der Meßkabel, die mittels SMA-Koaxialverbindern angeschlossen werden, zu erreichen.

An DELTA sind insgesamt 57 dieser BPMs im Einsatz. 14 davon sind in

²European Synchrotron Radiation Facility in Grenoble, Frankreich.

dem als Vorbeschleuniger dienenden Boostersynchrotron und 43 im Speicherring eingebaut. Die Positionen dieser 43 BPMs sind in Abbildung 4.2 eingetragen. 40 der BPMs sind, wie in Kapitel 2.4 gefordert, in Quadrupolmagnete eingebaut, 2 sind direkt vor und hinter dem Undulatorenmagneten U250 (Nr. 11 und Nr. 12) des Freie-Elektronen-Laser-Projektes [34] installiert und ein weiterer (Nr. 34) befindet sich in der gegenüberliegenden Geraden.

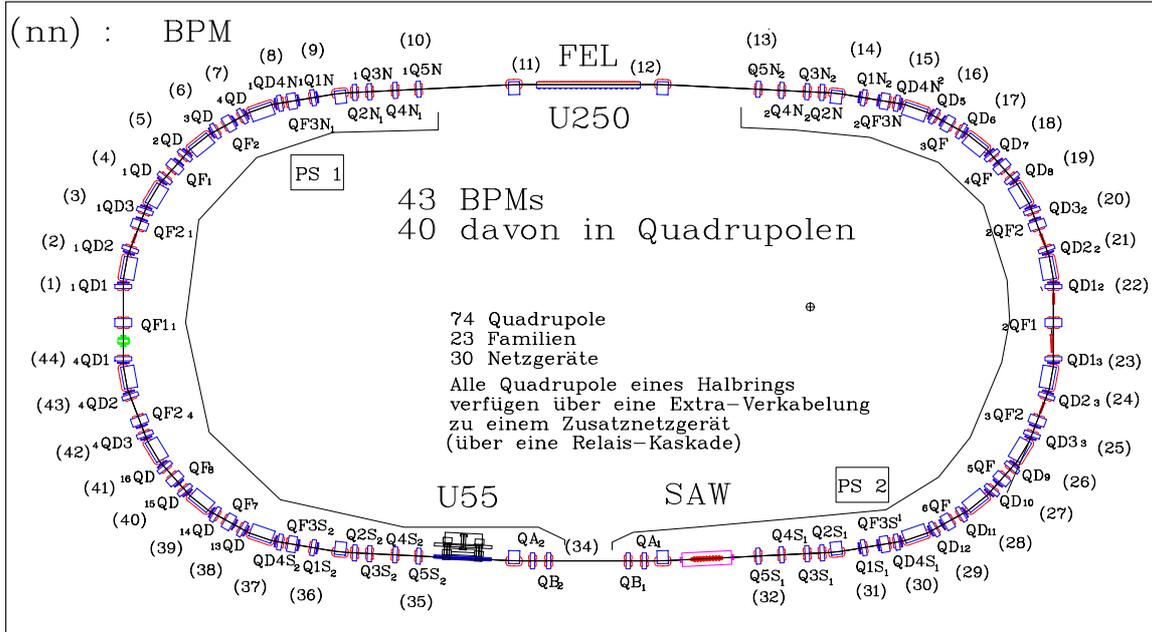


Abbildung 4.2: Abgebildet ist der Speicherring DELTA mit den Dipol- und Quadrupolmagneten und den 3 eingebauten bzw. geplanten Insertion-Devices (Supraleitender-Asymmetrischer-Wiggler SAW, Permanent-Magnet-Undulator U55 und Elektro-Magnetischer-Undulator U250). Die Positionen der Strahlagemonitore sind durch Nummern gekennzeichnet. An jedem Quadrupol ist der Name der zugehörigen Familie aufgetragen.

Von den in den Bögen installierten BPMs sind jeweils 2 an Anfang und Ende einer ca. 2,2m langen Vakuumkammer eingeschweißt. Diese Kammern haben einen Biegeradius von 3,31m und sind in die Dipolmagnete eingebaut. Die BPMs liegen in den Quadrupolen vor und hinter dem jeweiligen Magneten, die Bahnlänge von BPM zu BPM beträgt 1,89m. Die gebogenen Kammern sind mittels gerader Kammern verbunden; in jedem geraden Abschnitt ist mindestens ein Faltenbalg installiert, der zur Kompensation von Längenänderungen der Vakuumkammer, z.B. aufgrund thermischer Belastung, dient. Von diesen 2 BPMs, die bezüglich ihrer Funktion als Strahlagemonitor identisch sind, ist der eine vom Typ *variabel* und der andere *fixiert*. In Abbildung 4.3 ist dargestellt, wie ersterer in einem Quadrupolmagneten installiert ist.

In der Frontansicht ist ein Schnitt durch den im Quadrupol liegenden BPM zu erkennen, rechts ein Längsschnitt durch BPM und Quadrupol senkrecht zur x -

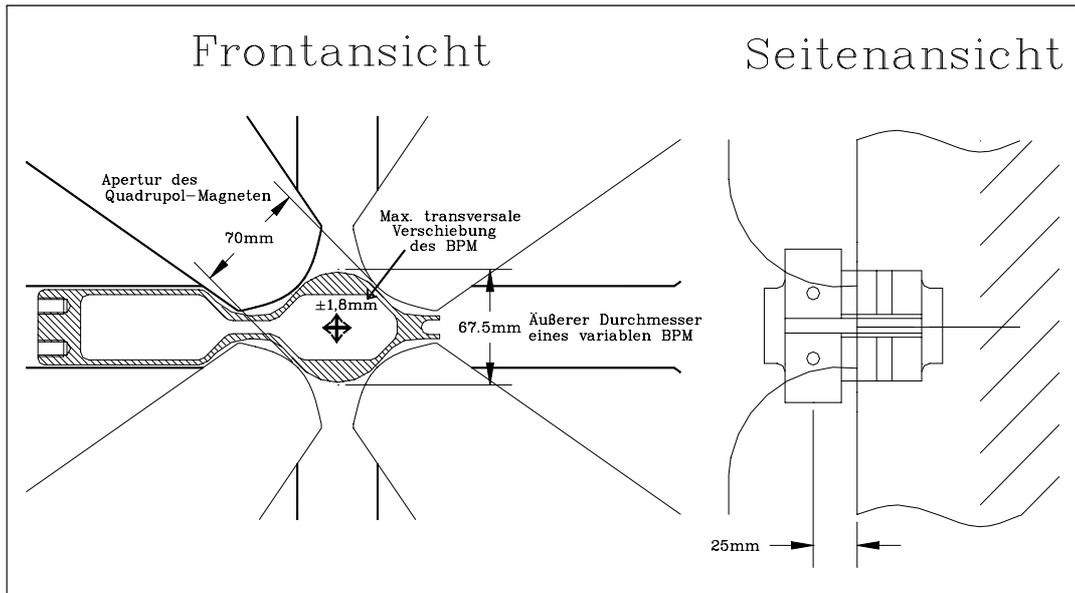


Abbildung 4.3: Dargestellt ist der Einbau eines BPM vom Typ *variabel* in einen Quadrupolmagneten. Links ist ein Schnitt entlang der Ebene der Pickup-Elektroden und rechts ein Schnitt senkrecht zur x-Achse dargestellt. Man erkennt, daß die Ebene der Pickup-Elektroden nicht innerhalb des Quadrupols, sondern ca. 25mm vor bzw. hinter dem Joch des Magneten liegt.

Achse. Die Ebene der Pickup-Elektroden liegt in einem Abstand von ca. 25mm vor dem Magnetjoch. Nur in dieser Ebene ist der Rahmen des BPM, wie in Abbildung 4.1 abgebildet, verstärkt. Der dahinter liegende Teil ist, bis auf den auf der Innenseite liegenden Pumpkanal und den auf der Außenseite befindlichen Kühlkanal zylindrisch, mit einem Durchmesser von $67,5\text{mm}$. Da die Apertur des Quadrupols 70mm beträgt, sind Verschiebungen des BPM um bis zu $\pm 1,8\text{mm}$ in jede Richtung aus der Mitte möglich. Die BPMs vom Typ *fixiert* unterscheiden sich nur, wie bereits erwähnt, durch eine veränderte Außenkontur von den *variablen* BPMs. Die *fixierten* BPMs weisen auf dem zylindrischen Teil des BPM innerhalb des Quadrupols eine Wulst mit einem Außendurchmesser von $69,9\text{mm}$ auf. Dieser Wulst gewährleistet, daß sich ein solcher BPM in transversaler Richtung nur um ca. $\pm 70\mu\text{m}$ bewegen kann, er aber trotzdem longitudinal beweglich ist und eine gewisse Verkippung erlaubt. Diese Anordnung von jeweils einem *fixierten* und einem *variablen* BPM an Anfang und Ende jeder Dipolkammer wurde gewählt, um zu verhindern, daß Temperaturveränderungen der Vakuumkammer Kräfte auf die Quadrupolmagnete ausüben.

Veränderungen der Temperatur der Vakuumkammer werden induziert durch Veränderungen der Kühlwassertemperatur und der eingebrachten Wärmeleistung durch Synchrotronstrahlung. Für die auf dem gesamten Umfang abgestrahlte Leistung, unter Vernachlässigung der Anteile von Insertion-Devices, gilt folgende

Größengleichung:

$$P[kW] = 88,5 \cdot \frac{E^4[GeV]}{R[m]} \cdot I[A] \quad (4.1)$$

E ist die Energie der Elektronen, R der Biegeradius der Dipolmagnete und I der mittlere Strahlstrom. Setzt man die für DELTA gültigen Parameter von $E = 1,45GeV$, $R = 3,31m$ und $I = 200mA$ ein, so erhält man eine auf dem ganzen Umfang abgestrahlte Leistung von $P = 23,6kW$ bzw. eine Leistungsdichte von $P = 205W/m$. An DELTA wird jeder Quadrant separat mit einer Durchflußmenge von $8l/min$ gekühlt. Daraus ergibt sich ein Temperaturgradient von ca. $11^\circ C$ entlang eines Quadranten. Da die Synchrotronstrahlungsleistung direkt proportional zum Strom der gespeicherten Elektronen ist, nimmt die Temperatur des Kühlwassers mit der Akkumulation stetig zu. Nimmt man an, daß eine typische DELTA-Dipolkammer einseitig eingespannt wird und sich die Temperatur des Kühlwassers um den obengenannten Wert verändert, so kommt es zu einer transversalen Verschiebung des anderen Endes um bis zu $1mm$. Übt die Kammer, z.B. über einen in diesen eingebauten BPM, Druck auf einen Quadrupol aus, so kann es zu einer Verschiebung oder Verkipfung desselben kommen. Eine solche würde, wie in Kapitel 2 beschrieben, zu großen Orbitstörungen führen, die bei Betrieb einer SR-Quelle unbedingt vermieden werden müssen und daher zu dem beschriebenen Design der BPMs geführt hat. Andererseits ist durch diese Konstruktion eine Referenzierung der BPMs auf die Quadrupolachsen erschwert. Um die geforderte absolute Auflösung der Strahllagebestimmung von $< 100\mu m$ zu erreichen, mußte daher eine geeignete Kalibrationsmethode entwickelt werden.

4.2 Meßelektronik

In Kapitel 2 wurde für das Strahllagemeißsystem eine relative Auflösung von einigen μm und eine absolute Genauigkeit in bezug auf die Quadrupolachsen von $< 100\mu m$ gefordert. Diese Werte müssen im Betrieb einer Speicherringanlage über Zeiträume von vielen Stunden, für unterschiedlich hohe Strahlströme und verschiedenste Füllmuster erreicht werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, bedarf es einer hochentwickelten Meßelektronik. Diese muß für DELTA den folgenden Anforderungen genügen:

- Um eine Auflösung von $1\mu m$ in der Mitte des DELTA-Strahllagemonitors zu erreichen, muß die Elektronik relative Änderungen der Meßsignale U_i an den Pickup-Elektroden von $\Delta U_i/U_i = 6 \cdot 10^{-5}$ detektieren können.
- Da DELTA sowohl im Singlebunch-Mode als auch im Multibunch-Mode betrieben wird und für die Experimente der Beschleunigerphysik und der Synchrotronstrahlungsnutzer unterschiedliche Strahlströme gefordert sind, muß ein Bereich von $1mA - 500mA$ von der Meßelektronik abgedeckt werden. Dies erfordert einem Dynamikbereich der Elektronik von $54dB$. Für Strahlpositionen außerhalb der Monitormitte sind die Signalfunktionen der

4 Pickup-Elektroden des DELTA-Strahllagemonitors voneinander verschieben. An der Position (10mm , 10mm) unterscheiden sich Maximal- und Minimalwert der Signalfunktionen um einen Faktor 13, daher erhöht sich der erforderliche Dynamikbereich um $+22\text{dB}$ auf 76dB , wenn für die Strahllagemessung ein Bereich von $\pm 10\text{mm}$ um die Monitormitte gefordert wird.

- Zur Messung der Strahlage werden Signale von 4 Pickup-Elektroden verarbeitet. Somit muß sichergestellt sein, daß die Signale aller Kanäle eines BPM in gleicher Weise verarbeitet werden und die Kanäle bei konstantem Strom über einen Dynamikbereich von 22dB linear arbeiten. Da eine absolute Meßgenauigkeit von $100\mu\text{m}$ gefordert ist, muß im oben genannten Bereich von $1\text{mA} - 500\text{mA}$ Strahlstrom, eine Stabilität der Lagemessung erreicht werden, die deutlich kleiner ist.
- Für einen Zyklus zwischen Beginn eines Synchrotronstrahlungs-Runs und der nächsten Füllung des Speicherringes, der bei DELTA 24h betragen soll, muß die Elektronik eine Stabilität in der Lagemessung von $10\mu\text{m}$ gewährleisten. In Kapitel 4.1 wurde bereits die Notwendigkeit der Kalibration des Lagemeßsystems angesprochen, um die erforderliche absolute Meßgenauigkeit zu erreichen. Da die Abstände, zwischen denen eine Neukalibration des Systems notwendig wird, möglichst groß sein sollen, muß die Elektronik auch auf einer Zeitskala von mehreren Wochen eine Stabilität in der Größenordnung von $50\mu\text{m}$ aufweisen.
- Da die wesentlichen Störungen des Closed-Orbits durch Stromschwankungen in Netzgeräten und Schwingungen von Magneten auf ihren Trägersystemen entstehen, die im Bereich von mHz bis einigen 100Hz liegen, wird eine Meßfrequenz der Meßelektronik von größer 1kHz gefordert, um ein effektives schnelles Orbit-Feedback zu ermöglichen.

Diese Anforderungen lassen sich durch unterschiedliche Elektronik-Konzepte verwirklichen. Zu unterscheiden ist zwischen der Messung im Zeitbereich, bei der die an den Pickup-Elektroden induzierten Spannungspulse jedes Elektronenbunches für jeden Umlauf gemessen werden und einer Messung im Frequenzraum.

Das Frequenzspektrum der Meßsignale ist bestimmt durch die Zahl der in DELTA gespeicherten Elektronenpakete und ihrer Anordnung entlang des Speicherringes. Da zur Beschleunigung der Elektronen hochfrequente Wechselfelder benötigt werden, können die Elektronen nur in Paketen, die einen Abstand von ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge der Hochfrequenz haben, gespeichert werden. An DELTA beträgt die Frequenz $f_{HF} = 499,820\text{MHz}$. Dies entspricht einer Wellenlänge von ca. 60cm . Auf dem Umfang des Speicherringes von $115,2\text{m}$ können somit 192 Positionen mit Elektronen gefüllt werden. Im einfachsten Fall eines einzelnen Elektronenpaketes enthält das Frequenzspektrum der Pickup-Signale alle Harmonischen der Umlauffrequenz f_u ($f = n \cdot f_u = n \cdot 2,603229\text{MHz}$ mit $n \in \mathbb{N}$), wobei in der Amplitude jeder Frequenzkomponente die Lageinformation des Elektronenstrahls enthalten ist. Da an DELTA prinzipiell beliebige Füllstrukturen möglich sind, z.B. eine symmetrische Vierbunchfüllung, die nur noch zu den

Spektrallinien $f = 4 \cdot n \cdot f_u$ führt, ist für die Lagemessung die Festlegung der Meßfrequenz entscheidend. Unabhängig von der Füllstruktur ist immer die Frequenz der Beschleunigungsstruktur f_{HF} und ihre Vielfachen im Signalspektrum enthalten. Für die Lagemessung wird daher meist die Amplitude bei $f_{Mess} = f_{HF}$, an DELTA somit $f_{Mess} = 499,820 MHz$, gemessen.

Die Abbildung 4.4 zeigt das Blockschaltbild der an DELTA eingesetzten Meßelektronik. Diese wurde von der Firma BERGOZ Precision-Beam-Instrumentation entwickelt [35] [36], basierend auf dem Konzept einer an der ALS³ entwickelten Monitorelektronik [37]. Die Elektronik mißt die Amplitude der $499,820 MHz$ -Komponente des Signalspektrums der 4 Pickup-Elektroden des DELTA-BPM, um daraus die Lageinformation zu gewinnen.

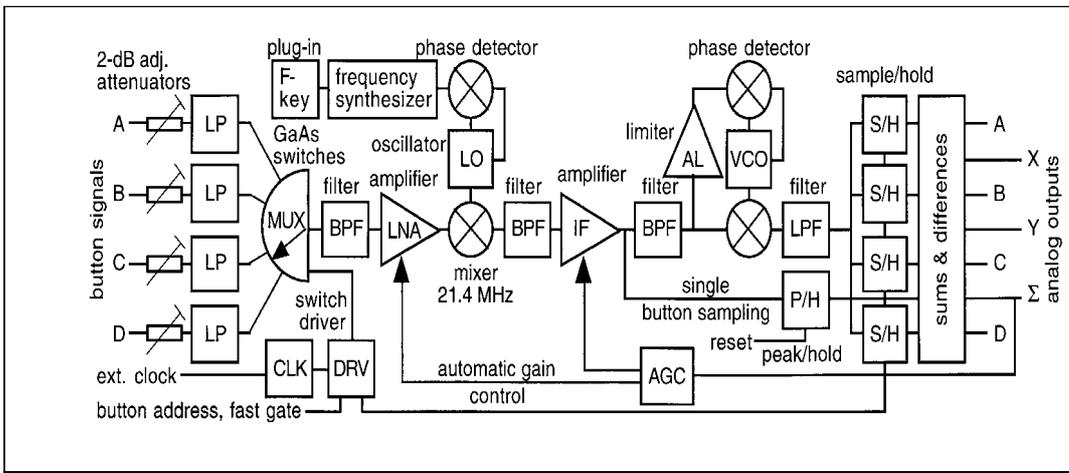


Abbildung 4.4: Blockschaltbild der an DELTA eingesetzten Meßelektronik zur Strahl Lagebestimmung. Die Elektronik wurde von der Firma BERGOZ, Frankreich, entwickelt, welche auch die Reproduktion dieses Bildes gestattete.

Eine gleiche Verstärkung für alle 4 Elektroden-Signale wird gewährleistet durch Multiplexen der Eingangskanäle mittels eines GaAs-Schalters, der mit einem internen Takt von $10 kHz$ betrieben wird. D.h. die 4 Signale eines BPM werden mit einer Frequenz von $2,5 kHz$ aufgenommen. Einstellbare Abschwächer in jedem Eingangskanal erlauben einen Abgleich der Empfindlichkeit individuell für jeden Kanal, um sicherzustellen, daß gleiche Eingangssignale auch zu gleichen Ausgangssignalen führen. Low-Pass-Filter mit einer Grenzfrequenz von $1 GHz$ schneiden die zur Messung nicht benötigten höheren Harmonischen der Umlauffrequenzen ab, um die Eingangsleistung am Multiplexer zu reduzieren. Die eigentliche Verstärker- und Gleichrichterstufe zur Messung der Amplitude jedes Eingangskanals ist als Heterodyn-Empfänger realisiert. Hinter dem Empfänger folgt eine vom zentralen Taktgenerator gesteuerte Sample und Hold-Stufe, die

³Advanced Light Source, Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation in Berkley, Kalifornien.

im Takt des Eingangsmultiplexers die 4 Meßsignale trennt und einem analogen Rechengatter zuführt, das aus den vier Signalen gemäß Gleichung 3.22 und 3.24 die Strahlage berechnet. Der Wert der Monitorkonstanten $a_x = 15,9mm$ und $a_y = 19,8mm$ wird über den Verstärkungsfaktor der Ausgangstufen berücksichtigt. Als Ergebnis erhält man 2 Spannungswerte U_x und U_y für die die Skalierung $10V \triangleq 10mm$ Ablage gilt. Die Gesamtverstärkung des Heterodyn-Empfängers wird so geregelt, daß die Summe aller 4 Meßsignale jeweils auf einem konstanten Wert gehalten wird. Auf diese Weise wird eine Normalisierung der 4 Signale erreicht, und das analoge Rechengatter kann immer im linearen Bereich betrieben werden.

Um die vom Hersteller garantierte Leistungsfähigkeit der Elektroniken zu kontrollieren, wurden Labortests durchgeführt. Dazu wurde ein Signalgenerator über einen Vierfach-Leistungsteiler mit der Meßelektronik verbunden und die Ausgangssignale mit einem 15Bit-ADC gemessen. Dieser erlaubt eine Auflösung von ca. $1\mu m$ bei einem Eingangsbereich des bipolaren ADC von $\pm 10V$ und dem für die an DELTA eingesetzten BERGOZ-Strahlagemesselektroniken gültigen Kalibrationsfaktors von $1mm/V$. Beide Geräte wurden zur Automatisierung der Messungen über das DELTA-Kontrollsystem angesprochen.

Abbildung 4.5 zeigt eine Messung über 220 Stunden, die bei einem Signalpegel von $-15dBm$ durchgeführt wurde, was einem mittleren Strahlstrom von ca. $100mA$ in DELTA entspricht. Man erkennt Schwankungen im Tagesverlauf von $\pm 1\mu m$ und eine maximale Variation der Lagemessung von $5\mu m$. Die erreichten Leistungsdaten entsprechen der geforderten Auflösung und sind mehr als eine Größenordnung besser als die für die absolute Genauigkeit geforderte Stabilität.

Weitere Messungen wurden durchgeführt, um den Dynamikbereich der Elektronik zu untersuchen. Dazu wurde der Eingangspegel an der Meßelektronik in einem Bereich von $-75dBm$ ($0,1mA$) bis $0dBm$ ($550mA$) variiert und die Ausgangssignale für die x - und die y -Koordinate aufgezeichnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

Im Arbeitsbereich der Elektronik von $0,1mA$ bis $500mA$ variiert die Messung der x -Koordinate um $20\mu m$, die der y -Koordinate um $10\mu m$. Die geforderte Stabilität über einen Dynamikbereich von $> 70dBm$ wird somit mehr als erreicht.

Beim Betrieb von DELTA für Synchrotronstrahlungsexperimente, der bezüglich der Stabilität des Closed-Orbit die höchsten Anforderungen stellt, ist der Strombereich typischerweise begrenzt auf den Bereich zwischen $30mA$ und $200mA$. In diesem Bereich wird eine Stabilität der Lagemessung von $< 5\mu m$ erreicht.

Die Meßelektroniken sind jeweils zu Gruppen von 4 in einen $19''$ -Baugruppenträger eingebaut und lokal in der Nähe der jeweiligen BPMs unter den Magnetträgern installiert. Um die insgesamt 43 in DELTA installierten BPMs zu versorgen, werden 12 dieser Einschübe eingesetzt. Die 4 Pickup-Elektroden jedes BPM sind über 2-fach geschirmte RG223 Koaxialkabel mit einer Impedanz von 50Ω , die mit SMA-Steckern konfektioniert sind, an die Meßelektroniken angeschlossen; die Länge der Meßkabel variiert zwischen $4m$ und $10m$ und deren Dämpfung für die $500MHz$ -Komponente des Meßsignals liegt bei ca. $0.3dB/m$. Der minimale Strom, bei dem die Strahlagemessung möglich ist, wird somit nur

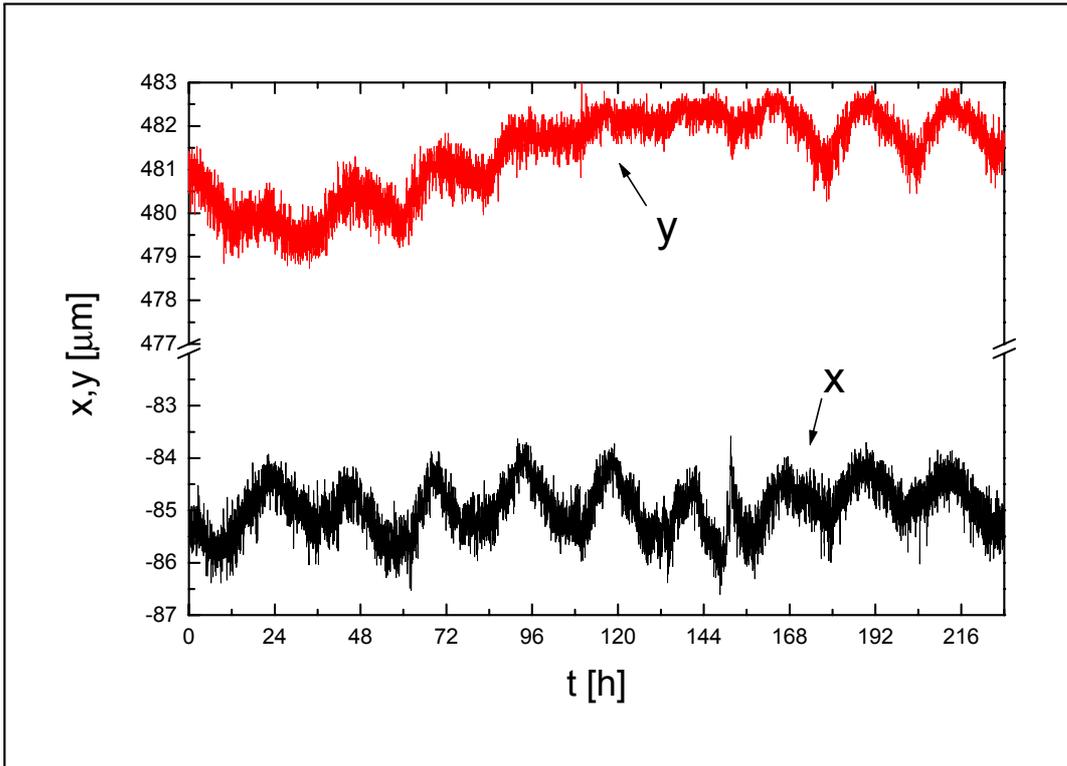


Abbildung 4.5: Messung der Lagesignale in x - und y -Richtung an der BERGOZ-Lagemeßelektronik über einen Zeitraum von $220h$. Die Meßelektronik war mittels eines 4fach-Leistungsteilers mit einem Signalgenerator verbunden. Der Eingangspegel von $-15dBm$ entspricht einem mittleren Strahlstrom von $100mA$.

halbiert und das preiswerte RG223U Kabel ist für diesen Verwendungszweck ausreichend.

4.3 Kontrollsystem-Anbindung

Um die mittels der Meßelektroniken gewonnenen Lageinformationen verarbeiten zu können, ist es notwendig, die analogen Ausgangssignale von jeweils $\pm 10V$ für die x - und y -Koordinate jedes BPMs zu digitalisieren und den Steuerrechnern des Kontrollsystems [38] der Beschleunigeranlage zur Verfügung zu stellen. Abbildung 4.7 zeigt schematisch die Realisierung dieser Anbindung. Dazu ist in jedem der $19''$ -Einschübe, der jeweils 4 BPM-Elektroniken enthält, ein sogenanntes CAN-BUS-Modul mit je 8 analogen Eingangskanälen installiert. Diese 8 Kanäle sind bipolar mit einem Wandlerbereich von $\pm 10V$ und haben eine Auflösung von 12Bit inklusive des Vorzeichen-Bits. Die insgesamt 12 CAN-BUS-Module sind in einer gemeinsamen Busleitung mit einer VME-CAN-Kopplerkarte mit einem lokalen Steuerrechner, der die Meßdaten aller BPMs aufnimmt und dieser über

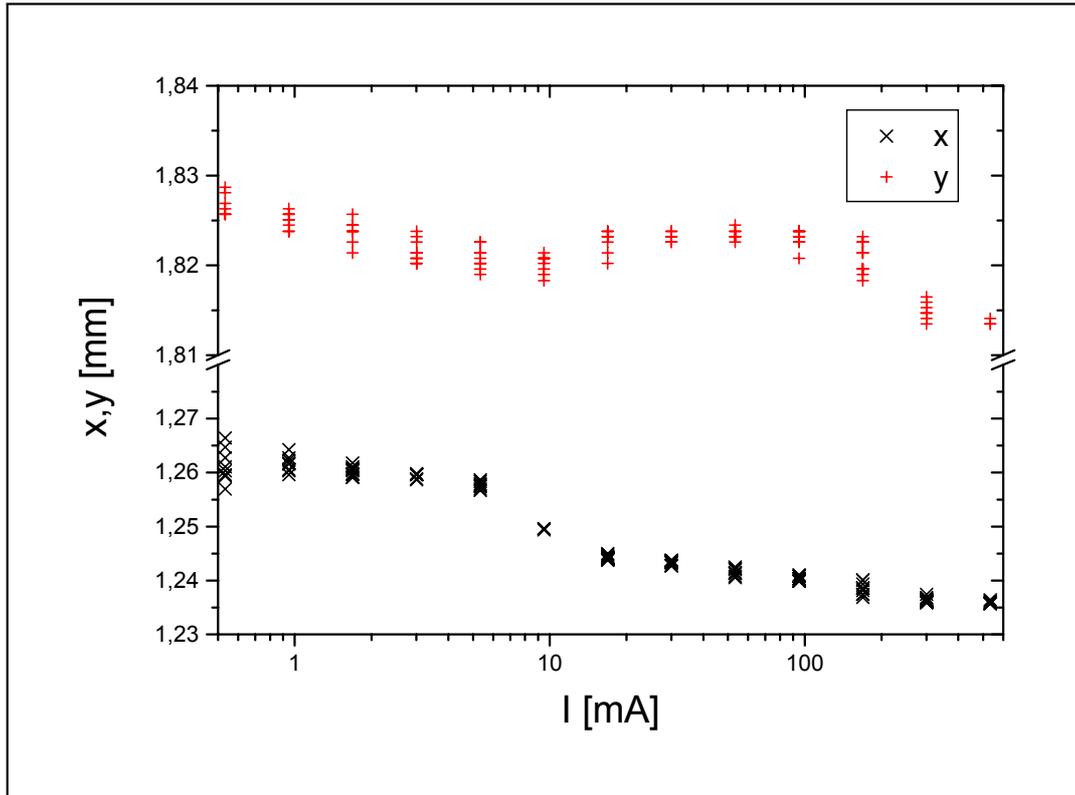


Abbildung 4.6: Messung der Lagesignale in x- und y-Richtung an der BERGOZ-Lagemeßelektronik bei Variation der Eingangssignale von $-75dBm$ bis $0dBm$. Dies entspricht einer Variation des mittleren Stroms in DELTA von $0,1mA$ bis $550mA$.

einen Ethernet-Anschluß mit den Leitrechnern des Kontrollsystems verbunden. Auf diesem Leitrechner stehen die Daten des Lagemeßsystems den verschiedensten Meßprogrammen sowie der Orbitkorrektur-Applikation zur Verfügung.

Die Auflösung von 12Bit bei einem Eingangsbereich des ADC von $\pm 10V$ und einer Skalierung der Meßsignale von $1mm/V$ ergibt eine Auflösung der Lage-messung von $10mm/2^{11} \approx 5\mu m$. Die vorliegende Installation erlaubt, bedingt durch die Datentransferrate der CAN-BUS-Verbindung, eine Auslesegeschwindigkeit von einer Orbit-Messung pro Sekunde an allen 43 BPMs und liegt somit weit unter der maximalen Meßfrequenz von $2,5kHz$ der BERGOZ-Lagemeßelektronik. Die Auflösung von $5\mu m$ und die Meßfrequenz von $1Hz$ sind zur Zeit für die Durchführung der Closed-Orbit-Korrektur bei der Kommissionierung der ersten Synchrotronstrahlungsbeamlines ausreichend. Für die Zukunft ist geplant, eine neue Kontrollsystem-Anbindung zu realisieren, die auf einem schnellen 16Bit-ADC basiert und deren Mittelungszeit von $10ms$ bis zu $10s$ einstellbar ist. Diese wird dann eine Auflösung von $< 1\mu m$ erlauben und eine Meßfrequenz für Closed-Orbit-Messungen von bis zu $100Hz$ ermöglichen.

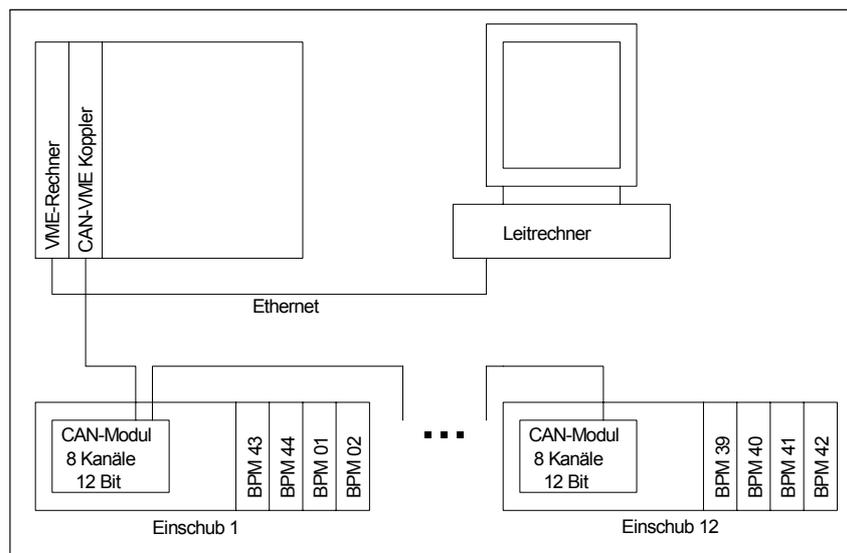


Abbildung 4.7: Schematische Abbildung der Anbindung der Strahlmeßelektroniken an das DELTA-Kontrollsystem.

4.4 Leistungsdaten des Strahlmeßsystems

Hier sollen noch einmal die Leistungsdaten des DELTA-Strahlmeßsystems zusammengefaßt werden. Festzustellen ist, daß die installierte Meßelektronik eine relative Auflösung bietet, die durch die Anbindung an das Kontrollsystem nicht voll genutzt werden kann. Daher ist für die Zukunft eine Aufrüstung der Kontrollsystemanbindung geplant, die die Nutzung der vollen Leistungsfähigkeit ermöglichen soll. Für die Kommissionierung von DELTA und der ersten Beamlines ist die aktuelle Kontrollsystemanbindung ausreichend.

Auflösung	$5\mu m$ (limitiert durch den 12Bit-ADC der Kontrollsystemanbindung) $< 1\mu m$ möglich
Stabilität	$< 5\mu m$ über 220h
Dynamikbereich	$< 20\mu m$ für $0,1mA - 500mA$ mittleren Strahlstrom $< 5\mu m$ für $30mA - 200mA$ mittleren Strahlstrom
Meßfrequenz	$1Hz$, limitiert durch Kontrollsystemanbindung max. $2,5kHz$ möglich

Kapitel 5

Kalibration des Lagemeßsystems

Im Verlauf der Arbeit wurde gezeigt, daß der Betrieb einer 3. Generation-Synchrotronstrahlungsquelle eine absolute Genauigkeit von $< 100\mu m$ in der Strahllagemessung in bezug auf die magnetischen Achsen der Quadrupolmagnete erfordert. Nur dann kann eine extrem kleine vertikale Emittanz von $< 100pm rad$ und die damit verbundene große Brillanz erreicht werden, die zur Durchführung vieler Experimente der Synchrotronstrahlungsnutzer notwendig ist.

Um diese Genauigkeit erreichen zu können, ist eine präzise Kalibration des Lagemeßsystems unumgänglich. Die gewählte Kalibrationsmethode muß den folgenden Anforderungen genügen:

- Zur Lagemessung ist das Zusammenspiel verschiedener Komponenten notwendig. Die am Strahllagemonitor anfallenden Meßsignale müssen über Kabel einer Lagemeßelektronik zugeführt werden, dort zu einem der Strahllage entsprechenden Signal umgewandelt und über einen geeigneten Meßwandler dem Kontrollsystem zur Verfügung gestellt werden. Ein Verfahren zur Kalibration muß alle Komponenten in geeigneter Weise berücksichtigen und die Genauigkeit des gesamten Systems, insbesondere die Referenzierung auf die Achse der Quadrupolmagnete, sicherstellen.
- Aufgrund der Komplexität des Lagemeßsystems und den langen Zeiträumen, über die die geforderte Genauigkeit sichergestellt werden soll, muß eine Kalibration einzelner Lagemonitore oder des gesamten Systems zu jeder Zeit wiederholbar sein.
- Die verfügbare Strahlzeit einer Synchrotronstrahlungsquelle soll zu einem möglichst großen Teil für den Nutzerbetrieb zur Verfügung stehen, die Kalibration des Lagemeßsystems darf daher nur wenig Zeit beanspruchen. Da üblicherweise pro Woche Strahlbetrieb 2 Schichten à 8 Stunden für die Maschinenentwicklung zur Verfügung stehen, sollte die Kalibration des Lagemeßsystems innerhalb von 8h durchführbar sein. Aufgrund der großen Zahl an BPMs, an DELTA sind es 43, muß der Arbeitsaufwand pro Lagemonitor möglichst klein sein.

In diesem Kapitel wird das für DELTA gewählte Verfahren zur Kalibration des Lagemeßsystems beschrieben. Es wird zuerst ein konventioneller Ansatz zur Kalibration vorgestellt, der die auftretenden Probleme aufzeigt und eine Diskussion der die Kalibration beeinflussenden Parameter erlaubt. Danach wird das für DELTA entwickelte Verfahren der strahlgestützten Kalibration und die benötigte Hardware vorgestellt.

5.1 Konventioneller Ansatz

Um die Bestimmung der Strahlage mit hoher relativer und absoluter Genauigkeit zu ermöglichen, ist eine genaue Kenntnis aller beteiligten Komponenten des Lagemeßsystems erforderlich. Daher ist es naheliegend, zur Kalibration des Systems jede Komponente einzeln zu betrachten. Um eine Lagemessung in bezug auf den Monitor zu ermöglichen, ist als erster Schritt eine Kalibration jedes Strahllagemonitors notwendig. Danach müssen die Einfügedämpfungen der Meßkabel, die die Pickup-Elektroden mit den Eingangskanälen der Meßelektronik verbinden und die hochfrequenten Signale übertragen, bestimmt werden. Abgeschlossen wird die Kalibration durch die Charakterisierung jedes Eingangskanals aller Meßelektroniken und deren Anbindung an das Kontrollsystem. Sind für jeden Strahllagemonitor alle einzelnen Komponenten vermessen, so ist eine Referenzierung der Strahllagemessung relativ zum Strahllagemonitor möglich. Da die Optimierung des Beschleunigerbetriebs eine Messung relativ zu den Achsen der Quadrupolmagnete erfordert, muß in einem letzten Kalibrationsschritt die Position der BPMs hinsichtlich der Achsen der Quadrupolmagnete bestimmt werden. Im folgenden wird am Beispiel von DELTA die Vorgehensweise für jede Komponente beschrieben:

Strahllagemonitor

Die genaue Kenntnis der Signalfunktionen $S_i^n(x, y)$ ¹ jeder Pickup-Elektrode der eingesetzten BPMs ist die Basis für eine präzise Bestimmung der Strahlage. Daher ist eine Vermessung jedes installierten BPM auf einem Teststand, der die Bestimmung der individuellen Signalfunktionen ermöglicht, notwendig. Die an DELTA eingesetzten Monitore sind jedoch, die Maßhaltigkeit der transversalen Monitorgeometrie betreffend, mit hoher Präzision gefertigt. Die Geometrie der Strahlkammer und die Positionen der Aufnahmen für die Pickup-Elektroden wurden mit Abweichungen von der idealen Geometrie von kleiner $30\mu m$ hergestellt. Simulationsrechnungen mit MAFIA haben gezeigt [27], daß eine transversale Fehlpositionierung der Elektroden nur zu einem Lagemeßfehler von ca. 50% der Fehlpositionierung führt.

Bei den Bohrungen für die Stufen in den Aufnahmen für die Elektroden (Abbildung 4.1) wurde die vorgegebene Toleranz jedoch nicht eingehalten. Dies führt

¹ $i \in \{1, \dots, 4\}$ unterscheidet dabei nach den Positionen der Pickup-Elektroden eines BPM (siehe Abbildung 4.1), während $n \in \{1, \dots, 43\}$ die verschiedenen BPMs indiziert.

dazu, daß die Elektroden um bis zu 0,3mm zur Außenseite des BPM zurückgezogen sind.² Zusammen mit Variationen der Übertragungsfunktionen der einzelnen Pickup-Elektroden führt dies zu einer strahlageunabhängigen Veränderung der Signalfunktionen bei der für DELTA gewählten Meßfrequenz von 500MHz um bis zu 0,5dB.

Untersuchungen an mehreren aus der Serienfertigung stammenden BPMs haben gezeigt [27], daß deren Signalfunktionen, bis auf individuell zu bestimmende Faktoren, identisch sind. Diese individuellen Signalfunktionen lassen sich folgendermaßen angeben:

$$k_i^n \cdot S_i^n(x, y) = S_i(x, y) \quad \text{mit } i \in \{1, 2, 3, 4\}, \quad n \in \{1, \dots, 43\} \quad (5.1)$$

Die $S_i(x, y)$ sind die Signalfunktionen des *idealen* BPM, die sich, wie in Kapitel 3 beschrieben, mit MAFIA in einer für die geforderte Auflösung und absoluten Genauigkeit der Strahllagemessung ausreichenden Weise berechnen lassen. Unter der Kalibration der Strahllagemonitore ist somit die Bestimmung der Faktoren k_i^n zu verstehen, mit denen die Signalfunktionen multipliziert werden müssen, um diese an die Signalfunktionen des *idealen* BPM anzupassen.

Da für den *idealen* Strahllagemonitor die Signalfunktionen für einen zentrierten Strahl ($x = 0mm, y = 0mm$) identisch sind

$$S_1(0, 0) = S_2(0, 0) = S_3(0, 0) = S_4(0, 0) \quad (5.2)$$

(die Abweichung zwischen den Signalfunktionen S_1 und S_2 bzw. S_3 und S_4 aufgrund des Pumpschlitzes beträgt lediglich 0,0026dB und kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden) können die k_i^n bestimmt werden, indem für jeden BPM auf einem Teststand die 4 Signalfunktionen, mit zentrierter Antenne als Strahlsimulation, gemessen werden. Für diese und die Kalibrationsfaktoren erhält man durch Einsetzen von 5.1 in 5.2:

$$k_1^n \cdot S_1^n(0, 0) = k_2^n \cdot S_2^n(0, 0) = k_3^n \cdot S_3^n(0, 0) = k_4^n \cdot S_4^n(0, 0) \quad (5.3)$$

Da die Normierung der Signalfunktionen willkürlich erfolgt, kann diese so gewählt werden, daß für jeden BPM $k_1^n = 1$ gilt. Die Kalibrationsfaktoren lassen sich dann aus den Meßwerten für die $S_i^j(0mm, 0mm)$ folgendermaßen bestimmen:

$$k_2^n = \frac{S_1^n(0, 0)}{S_2^n(0, 0)}, \quad k_3^n = \frac{S_1^n(0, 0)}{S_3^n(0, 0)}, \quad k_4^n = \frac{S_1^n(0, 0)}{S_4^n(0, 0)} \quad (5.4)$$

Die Genauigkeit ist limitiert durch den Fehler bei der Zentrierung der Antenne zur Strahlsimulation im BPM.³ Diese Methode setzt jedoch voraus, daß jeder

²Ein Hineinragen der Elektroden in den Querschnitt der Strahlkammer wurde durch eine Einbaulehre beim Einschweißen der Pickup-Elektroden verhindert.

³Die Positioniergenauigkeit der Antenne bzgl. der Monitormitte beträgt 20µm.

BPM nach Einschweißen der Pickup-Elektroden auf einem Teststand vermessen werden kann. Da an DELTA die BPMs Teil der Vakuumkammer sind und die Pickup-Elektroden erst am Ende der Fertigung nach dem Vakuum-Glühen der Kammern eingebaut werden, ist eine solche individuelle Vermessung mit einem Antennenmeßstand nicht möglich.

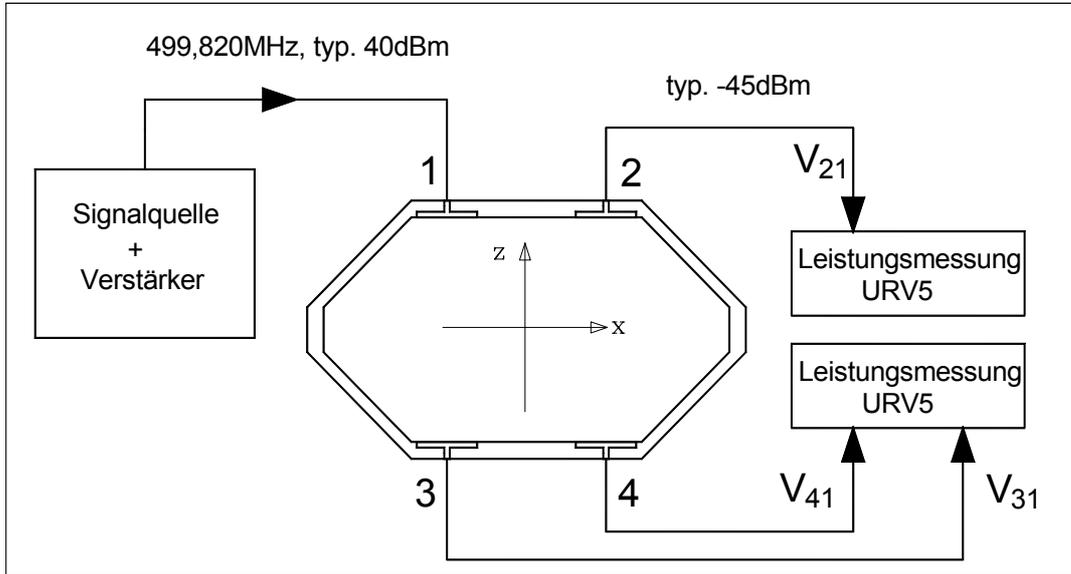


Abbildung 5.1: Schematische Abbildung zur Vorgehensweise bei der Kalibration der Strahl-lagemonitore nach der Pickup-Methode. Ein Signalgenerator ist mit Pickup-Elektrode 1 verbunden und die induzierten Signale an den verbleibenden Elektroden werden gemessen. Diese Messung wird für alle Pickups als Sender wiederholt.

Für DELTA wurde daher zur Kalibration der BPMs die Pickup-Kalibrationsmethode [27] entwickelt. Diese erlaubt eine Kalibration im eingebauten Zustand. Dazu wird ein Signalgenerator mit Leistungsverstärker an Pickup Nr.1 angeschlossen (Abbildung 5.1). Dieser wird bei der Meßfrequenz der BPM-Elektronik von $500MHz$ und einem Pegel von $40dBm$ betrieben. Es werden dann die an den 3 übrigen Pickup induzierten Signale $V_{j,1}$, $j \in \{2, 3, 4\}$ (der hochgestellte Index n , der den BPM kennzeichnet, wird im weiteren nicht fortgeschrieben) mit empfindlichen HF-Millivoltmetern bestimmt. Der Pegel der Meßsignale liegt im Bereich von $-51dBm$ bis $-39dBm$. Diese Messung wird nacheinander mit jedem Pickup als Sender wiederholt. Als Ergebnis erhält man 12 Meßwerte $V_{i,j}$ mit $i, j \in \{1, 2, 3, 4\} \wedge i \neq j$, von denen für den idealen BPM aufgrund seiner Symmetrie einige identisch sind:

$$\begin{aligned}
 V_{1,2} &= V_{3,4} = V_{2,1} = V_{4,3} \\
 V_{1,3} &= V_{2,4} = V_{3,1} = V_{4,2} \\
 V_{1,4} &= V_{2,3} = V_{3,2} = V_{4,1}
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Für einen realen BPM mißt man jedoch $\tilde{V}_{i,j}$ die diese Relationen nicht erfüllen, da sie durch die unterschiedlichen Übertragungsfunktionen der Pickup-Elektroden und deren radialer Fehlpositionierung beeinflußt werden. Für die Beziehung zwischen den realen $\tilde{V}_{i,j}$ und idealen $V_{i,j}$ kann folgender Zusammenhang postuliert werden:

$$V_{i,j} = a_i \cdot b_j \cdot \tilde{V}_{i,j} \quad (5.6)$$

Dabei ist der Faktor a_i durch die Elektrode, an der gemessen wird, und der Faktor b_j durch die Elektrode, von der gesendet wird, bestimmt. Durch Verwendung der Gleichungen 5.5 und geeigneter Quotientenbildung lassen sich die b_j eliminieren und die a_i der verschiedenen Pickup-Elektroden bestimmen. Normiert man wieder so, daß $a_1 = 1$ gilt, erhält man:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 & a_2 &= \sqrt{\frac{\tilde{V}_{1,4} \cdot \tilde{V}_{1,3}}{\tilde{V}_{2,4} \cdot \tilde{V}_{2,3}}} \\ a_3 &= \sqrt{\frac{\tilde{V}_{1,4} \cdot \tilde{V}_{1,2}}{\tilde{V}_{3,4} \cdot \tilde{V}_{3,2}}} & a_4 &= \sqrt{\frac{\tilde{V}_{1,2} \cdot \tilde{V}_{1,3}}{\tilde{V}_{4,2} \cdot \tilde{V}_{4,3}}} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Messungen an mehreren BPMs aus der Serienfertigung haben gezeigt, daß die so bestimmten a_i identisch sind mit den Kalibrationsfaktoren k_i . Es konnte gezeigt werden, daß die mittels der Pickup-Kalibrationsmethode bestimmten $k_i = a_i$ eine Genauigkeit der Strahlagebestimmung in bezug auf die Mitte der BPM von $< 100\mu m$ erlauben. Dabei ist zu beachten, daß bei der Pickup-Kalibrationsmethode die Meßwerte durch die Asymmetrie des Pumpschlitzes der DELTA-Vakuumkammer beeinflußt werden. Dies führt zu einer Verschiebung des Kalibrationspunktes in der horizontalen Ebene um $0,3mm$. Dieser Wert kann jedoch bei der Strahlagebestimmung berücksichtigt werden, indem er vom Meßwert der horizontalen Strahlposition abgezogen wird.

Wesentliche Störeinflüsse dieser Messung sind darin begründet, daß Signalpegel von $< -50dBm$ in unmittelbarer Nähe eines Senders mit einer Ausgangsleistung von $+40dBm$ mit einer Genauigkeit von $< 0,02dB$ gemessen werden müssen. Dies erfordert die Verwendung entsprechend geschirmter Kabel und Meßgeräte.

Aus diesem Grund ist auch eine Kalibration des BPM unter Einbeziehung der Meßkabel an DELTA nicht möglich. Bei der notwendigen hohen Sendeleistung von $40dBm$ ist die Schirmdämpfung der verwendeten Meßkabel nicht ausreichend; bei den als paralleles Bündel verlegten Kabeln kommt es, je nach Länge, zu einer Einstrahlung in die benachbarten Meßkabel von bis zu $-60dBm$. Damit ist eine Kalibration mit der geforderten Genauigkeit unter Einbeziehung der Meßkabel mit dieser Methode nicht möglich. Ein Test, ob alle Meßkabel korrekt angeschlossen sind oder es zu größeren Veränderungen der Einfügedämpfung bei deren Verlegung gekommen ist, konnte jedoch durchgeführt werden.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß zur Durchführung der Messungen die Anschlußstecker von Signalquelle und Meßgeräten an den verschiedenen Pickups mehrmals zu lösen und wieder zu verbinden sind. Eine Reproduzierbarkeit von $< 0,02dB$ muß hier gewährleistet sein, daher ist die Verwendung von hochwertigen Meßkabeln mit präzisen Anschlußsteckern notwendig.

Meßkabel

Die Meßkabel aller Strahltagemonitore sind einzeln zu vermessen und ihre Dämpfung zu protokollieren. Diese Messung muß ebenfalls bei der Meßfrequenz der BPM-Elektroniken durchgeführt werden. Aus den Dämpfungswerten können dann Kalibrationsfaktoren für die Meßkabel gewonnen werden, mit denen die Meßwerte der 4 Pickup-Signale multipliziert werden müssen, um gleiche Meßwerte für einen zentrierten Strahl zu erhalten. Bei Kabellängen zwischen $3m$ und $10m$ liegt die Dämpfung der Meßkabel zwischen $0,9dB$ und $3dB$, die wiederum mit einer Genauigkeit von $< 0,02dB$ bestimmt werden muß.

Beeinträchtigt wird die Kalibrationsmessungen der Kabel durch die Reproduzierbarkeit der Verbindung der Kabel mit der Meßeinheit und dem Anschluß an die Monitorköpfe. Weiter ist zu beachten, daß die Einfügedämpfung auch bei der Verlegung der Kabel verändert werden kann, wenn der minimal spezifizierte Biegeradius der Kabel unterschritten oder das Kabel gequetscht wird.

Meßelektronik und Kontrollsystemanbindung

Im dritten Schritt der Kalibrationsmessungen wird sichergestellt, daß die 4 Eingangskanäle der Meßelektroniken identisch sind und daß gleiche Eingangssignale auch in gleicher Weise verstärkt werden. Da die an DELTA eingesetzten Elektroniken dem Kontrollsystem direkt Werte für die x - und y -Koordinaten liefern, gibt es zusätzliche Ausgänge, an denen die verarbeiteten Meßsignale einzelner Kanäle abgegriffen werden können. Mit Hilfe von, auf den Elektroniken integrierten, einstellbaren Dämpfungsgliedern (Abbildung 4.4) können die Eingangskanäle so abgeglichen werden, daß gleiche Eingangssignale, die mittels eines Signalgenerators und eines präzise kalibrierten 4-fach Leistungsteilers eingespeist werden, auch gleiche Ausgangssignale liefern. Abschließend wird geprüft, ob die Digitalisierung der Lagemeßsignale und die Übertragung an das Kontrollsystem korrekt erfolgt. Diese Messungen müssen für verschiedene Signalpegel durchgeführt werden, um die Konstanz der Kalibrationsfaktoren über den Dynamikbereich der Elektroniken zu untersuchen. Die Genauigkeit dieser Messung ist bestimmt durch den Abgleich des 4-fach-Leistungsteilers und der Reproduzierbarkeit der Koaxialverbinder zum Anschluß der Monitorelektronik.

Kalibration des Gesamtsystems

Als Ergebnis ist festzuhalten, daß eine nach dieser Methode durchgeführte Kalibration eine Vielzahl von Einzelmessungen erfordert. Im Fall des Lagemeßsystems

von DELTA sind 43 BPM nach der Pickup-Methode zu kalibrieren, die Dämpfungswerte der 172 Meßkabel zur Verbindung der Pickup-Elektroden mit den BPM-Elektroniken zu bestimmen, 172 Eingangskanäle der BPM-Elektroniken abzugleichen und abschließend die 86 ADC-Kanäle der Kontrollsystemanbindung zu prüfen. Um eine absolute Genauigkeit der Lagemessung in bezug auf den BPM von $< 100\mu m$ zu erzielen, ist für jeden Kanal eine Genauigkeit von $< 0,02dB$ notwendig. Da sich der Kalibrationsfaktor als Produkt von 4 Einzelmessungen ergibt, ist für die Genauigkeit jedes Einzelschritts ein Wert von $< 0,005dB$ erforderlich. Dieser Wert liegt im Bereich der Reproduziergenauigkeit der SMA-Koaxialverbinder, mit denen BPMs, Kabel und Meßelektronik ausgestattet sind. Um diese Genauigkeit zu erzielen, ist daher eine mehrfache Durchführung aller Einzelmessungen notwendig. Die Kalibration eines Monitors nach dieser Methode erfordert einen Zeitbedarf von ca. 4h.

Im letzten Schritt muß eine Referenzierung der BPMs in bezug auf die Achsen der Quadrupole, in die diese eingebaut sind, stattfinden. BPMs vom Typ *fixiert* sind aufgrund ihrer Konstruktion auf besser als $70\mu m$ in ihrem Quadrupol installiert, die vom Typ *variabel* müssen individuell in ihrem Quadrupol vermessen werden,⁴ da sie sich um bis zu $\pm 1,7mm$ transversal bewegen können.

Abschließend ist festzustellen, daß diese Vorgehensweise zur Kalibration sehr aufwendig, zeitintensiv und aufgrund der Vielzahl notwendiger Einzelmessungen fehleranfällig ist. Insbesondere die abschließende Referenzierung in bezug auf die Quadrupolmagnete ist in der geforderten Genauigkeit nur mit hohem Aufwand zu leisten.

Eine Wiederholung der Kalibration erfordert das Auftrennen und Schließen der SMA-Koaxialverbinder an BPM und Elektronik, wobei eine zusätzliche, unbekannte Dämpfung in den Meßkanal eingebracht werden kann, die die geforderte Genauigkeit unmöglich macht. Insbesondere ist ein einfacher Test der Gültigkeit der Kalibration nicht möglich ohne Zugang zu den Komponenten des Meßsystems zu haben und massiv in das System einzugreifen.

Diese Methode der Kalibration wird daher an DELTA nur an Monitoren eingesetzt, die nicht in Quadrupolmagnete eingebaut sind. Von den insgesamt 43 BPMs sind dies nur die 3 in den langen Geraden eingebauten (Abbildung 4.2). Von besonderer Bedeutung sind hier die Strahllagemonitore, die vor und hinter dem Undulatomagneten des FEL-Experimentes eingebaut sind. Diese wurden absolut nach dieser Methode kalibriert, um eine Referenzierung der Lagemessung auf die Monitore zu ermöglichen. Aus Orbitmessungen konnten wichtige Informationen über die Positionierung der Vakuumkammer in Relation zu den Spiegelkammern des FEL-Experimentes gewonnen werden, die eine Zentrierung der Vakuumkammer auf der Achse des optischen Resonators des Experiments erlaubten [39].

⁴Dazu müssen geeignete Meßtaster eingesetzt werden, die eine Lagemessung der Außenkontur des BPM in Relation zu den Polflächen der Quadrupolmagnete erlauben.

5.2 Strahlgestützte Kalibration

Alle oben aufgeführten Probleme lassen sich durch eine strahlgestützte Kalibrationsmethode vermeiden. Das dieser Methode zugrundeliegende Prinzip ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Das Feld eines Quadrupolmagneten verschwindet auf der magnetischen Achse und steigt proportional zur Ablage in horizontaler und vertikaler Richtung an. Dabei muß unterschieden werden zwischen horizontal fokussierenden Magneten, in denen ein Strahl mit Ablage in der x -Ebene einen Kickwinkel zur Achse und mit Ablage in der y -Ebene von der Achse weg erfährt, und horizontal defokussierenden Magneten, in denen die Verhältnisse umgekehrt sind. Beide Magnettypen gehen durch 90° -Drehung um die s -Achse ineinander über.

In Abbildung 5.2 sind die Verhältnisse für einen horizontal fokussierenden Quadrupolmagneten dargestellt. Dieser hat im Normalzustand eine feste Fokussierstärke k , die bestimmt ist durch die Optik der Beschleunigeranlage und lenkt einen Strahl mit einer Ablage von Δx in der horizontalen Ebene beim Durchgang durch den Magneten zurück zur Achse.

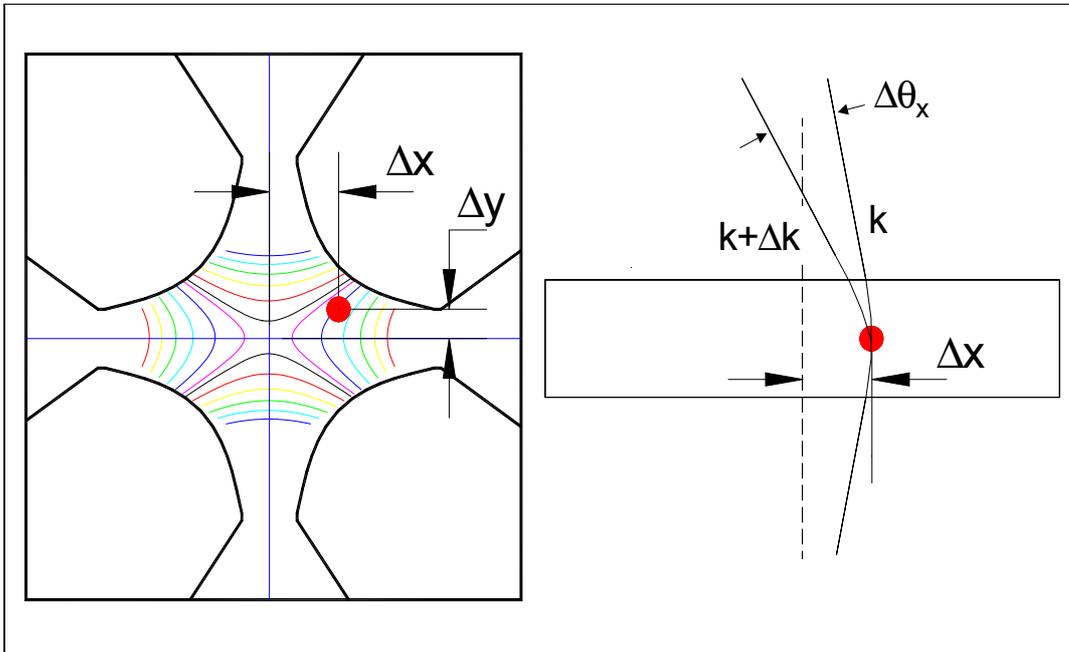


Abbildung 5.2: Schematische Abbildung des Funktionsprinzips der strahlgestützten Kalibration. Ein Teilchenstrahl, der mit horizontaler oder vertikaler Ablage einen Quadrupolmagneten passiert, erfährt eine zusätzliche Ablenkung um $\Delta\theta_x$ im Feld des Quadrupols, wenn der k -Wert des Quadrupols um Δk verändert wird. Diese ist proportional zu seiner Ablage Δx in bezug auf die Achse des Quadrupolmagneten.

Wird der k -Wert des Quadrupols um Δk verändert, erfährt der Strahl in einem Magneten der magnetischen Länge l_{mag} einen Kickwinkel von (das positive

Vorzeichen gilt für horizontal fokussierende Quadrupole⁵):

$$\Delta\theta_x = +l_{mag} \cdot \Delta k \cdot \Delta x \quad (5.8)$$

Dieser ist proportional zur Veränderung Δk des k -Wertes und der Ablage Δx und führt zu einer Closed-Orbit-Verschiebung, die sich auf dem Umfang des ganzen Beschleunigers auswirkt. Für die vertikale Ebene gilt analog (wiederum für einen horizontal fokussierenden Quadrupol):

$$\Delta\theta_y = -l_{mag} \cdot \Delta k \cdot \Delta y \quad (5.9)$$

Diese Eigenschaft der Quadrupole eröffnet die Möglichkeit, die Position der magnetischen Achse dieser Magnete zu bestimmen.

Geht der Strahl in einer Ebene ohne Ablage durch den Quadrupol, so ist gemäß Gleichung 5.8 und 5.9 der durch eine Veränderung des k -Wertes entstehende Kickwinkel $\Delta\theta$ gleich Null und ein Einfluß auf den Closed-Orbit ist nicht festzustellen. Man hat somit eine direkte Möglichkeit, durch Messungen bei gespeichertem Elektronenstrahl, Informationen über die Lage der Quadrupolachsen in bezug auf das Lagemeßsystem zu erhalten.

Die Durchführung dieser Messung ist auf unterschiedliche Weise möglich. So kann dem zu untersuchenden Quadrupolmagneten eine statische Veränderung des k -Wertes aufgeprägt und vorher und nachher der Closed-Orbit gemessen werden. Durch Verschieben des Strahls im Magneten und wiederholter Messungen des Closed-Orbits mit und ohne Veränderung des k -Wertes, kann die Position bestimmt werden, bei der die entstehende Orbitstörung minimal ist. Die Position des Strahls im Quadrupol, die zu einer minimalen Störung führt, entspricht der Position seiner magnetischen Achse [40]. Dieses Prinzip wird auch an DELTA verfolgt und im nächsten Abschnitt detailliert beschrieben.

Die Veränderung des k -Wertes kann auch dynamisch erfolgen und der k -Wert sinusförmig mit der Frequenz ν moduliert werden. Indem an einem geeigneten Monitor⁶ die entstehende Orbitstörung im Frequenzbereich selektiv bei der Frequenz ν gemessen wird, kann mit hoher Sensitivität die Orbitstörung nachgewiesen und die Position im Quadrupol bestimmt werden, für den diese minimal ist. Durch die Frequenzselektivität ist es möglich, die Messung mit verschiedenen Frequenzen an mehreren Quadrupolmagneten gleichzeitig durchzuführen [41].

Die Vorteile einer strahlgestützten Kalibration liegen auf der Hand:

- Die Messung liefert direkt die Information über die Position der Quadrupolachse.

⁵Der k -Wert eines in der horizontalen Ebene fokussierenden Quadrupol ist, gemäß Konvention, negativ [8].

⁶Z.B. ein elektrischer Strahllagemonitor mit einer der Anregungsfrequenz angepaßten Bandbreite oder aber auch eine Synchrotronstrahlungsbeamline mit einem lagesensitiven PSD (Position Sensing Detector).

- Alle Komponenten des Strahllagemesssystems sind in ihrem vollständig installierten, betriebsbereiten Zustand an der Messung beteiligt. Es müssen keine Kabelverbindungen aufgetrennt oder in anderer Weise in das Meßsystem eingegriffen werden.
- Die Messung kann bei Betrieb der Anlage für jeden einzelnen Monitor jederzeit wiederholt werden.
- Der Arbeitsaufwand ist gering, da die Kalibrationsmessung direkt vom Kontrollraum der Beschleunigeranlage mit vorgefertigten Software-Tools durchgeführt wird.

Als Nachteil ist zu betrachten, daß diese Messung gespeicherten Strahl einer bestimmten Mindestintensität voraussetzt. Im allgemeinen sind die Anforderungen an das Lagemeßsystem zur Erzielung der ersten Umläufe in einer neuen Anlage und zum Speichern und Akkumulieren wesentlich geringer, als für die Optimierung der Anlage, um die optimalen Leistungsdaten zu erreichen, gefordert wird. An DELTA war es möglich, Ströme von $> 10mA$, ohne Kalibration des Lagemeßsystems, zu akkumulieren. Zur Durchführung präziser Lagemessungen sind Ströme von $> 2mA$ ausreichend.

Die Quadrupol-Kick-Methode

Die an DELTA eingesetzte Methode der strahlgestützten Kalibration basiert auf einer statischen Veränderung des k -Wertes des Quadrupols, in den der zu kalibrierende BPM eingebaut ist und der Messung der resultierenden Closed-Orbit-Störung an allen verfügbaren BPMs. Der Winkelkick $\Delta\theta_x$, den ein Strahl mit horizontaler Ablage Δx^q in einem Quadrupol erfährt, wenn dessen k -Wert um Δk verändert wird, führt zu einer Orbitstörung Δx^i am i -ten BPM, die sich wie folgt berechnen läßt:

$$\Delta x^i = \frac{\sqrt{\beta_x^i \cdot \beta_x^q}}{2 \cdot \sin(\pi Q_x)} \cdot \cos(\pi Q_x - |\phi_x^i - \phi_x^q|) \cdot (l_{mag} \cdot \Delta k \cdot \Delta x^q) \quad (5.10)$$

Dabei bezeichnet der hochgestellte Index i die Position an der gemessen wird und q den Ort der Störung, β_x und ϕ_x sind die Betafunktion und die Betatronphase der horizontalen Ebene, Q_x deren Q-Wert (Abschnitt 2.2). Für die vertikale Ebene gilt ein analoger Zusammenhang.

In Abbildung 5.3 ist die aus einer Veränderung des k -Wertes von Quadrupol QD-2 um 3,8% bei einer vertikalen Ablage des Strahls von $\Delta y^q = -0,60mm$ resultierende, an DELTA gemessene, Orbitstörung abgebildet. Der k -Wert des Quadrupols QD-2 beträgt $k = 2,35 \cdot 1/m^2$, seine magnetische Länge ist $l_{mag} = 0,234m$. In diesen Quadrupol, der horizontal defokussierend wirkt, ist BPM5 eingebaut. Ebenfalls abgebildet ist die mit MAD berechnete, durch einen vertikalen Dipolkick an der Stelle des Quadrupols QD-2 erzeugte Orbitstörung. Um den Vergleich zu erleichtern, ist die Ablage normiert dargestellt. Diese wurde durch die Wurzel aus der Betafunktion dividiert und das Ergebnis gegen die

Betatronphase aufgetragen. Man erkennt die sehr gute Übereinstimmung von Messung und theoretischer Vorhersage.

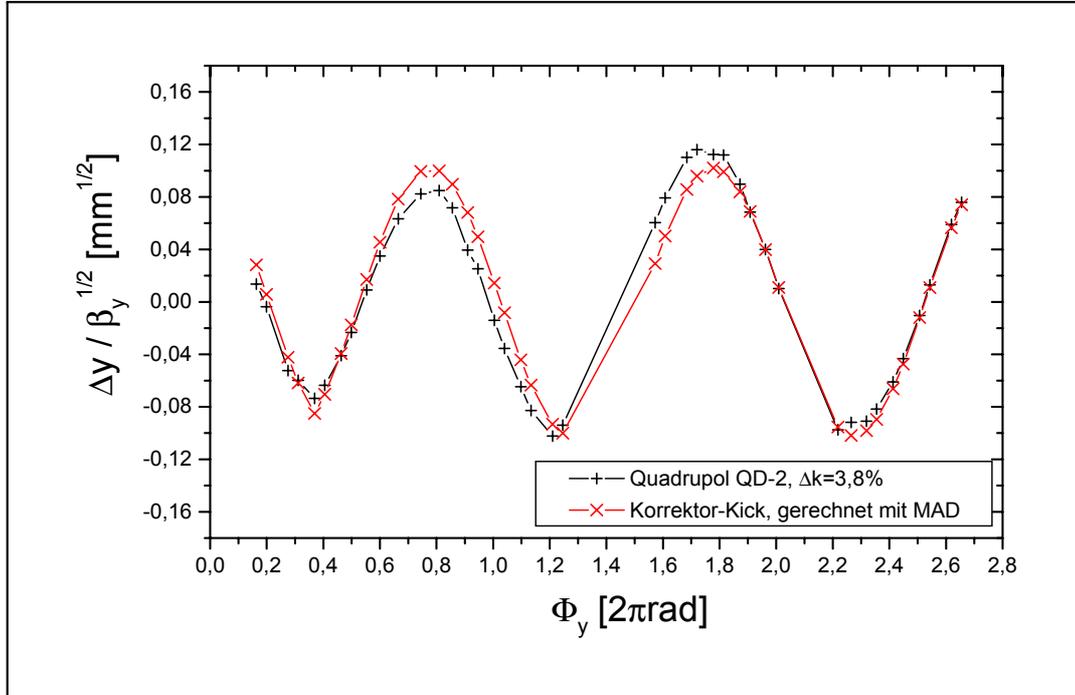


Abbildung 5.3: Abgebildet ist die gemessene Closed-Orbit-Störung, die aus einer Variation des k -Wertes von Quadrupol QD-2 ($k = 2,35 \cdot 1/m^2$) um 3,8% bei einer vertikalen Strahlablage von $-0,60mm$ resultiert. Ebenfalls eingetragen ist die aus einem vertikalen Dipolkick an der Position von QD-2 entstehende, mit MAD berechnete Orbit-Störung. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, ist die Ablage normiert dargestellt, indem durch die Wurzel aus der Betafunktion dividiert wurde und das Ergebnis gegen die Betatronphase aufgetragen ist. Man erkennt die gute Übereinstimmung zwischen Messung und theoretischer Berechnung entlang des gesamten Ringumfangs.

Um die Position der Achse des Quadrupols im Referenzsystem des BPM zu bestimmen, wird wie folgt vorgegangen. Der gespeicherte Elektronenstrahl wird mittels einer abgeschlossenen 3er-Beule, die durch 3 Korrekturmagnete vor und hinter dem zu untersuchenden Quadrupol aufgespannt wird, schrittweise durch den Quadrupol geschoben. An jeder Position wird der k -Wert des Quadrupols um Δk verändert und die entstehende Orbitstörung gemessen. Aus den Meßwerten

wird die mittlere quadratische Ablage berechnet. Für diese gilt:

$$\begin{aligned}
\overline{\Delta x^2} &= \frac{1}{43} \cdot \sum_{i=1}^{43} (\Delta x^i)^2 \\
&= \frac{1}{43} \cdot \sum_{i=1}^{43} \left(\frac{\sqrt{\beta_x^i \cdot \beta_x^q}}{2 \cdot \sin(\pi Q_x)} \cdot \cos(\pi Q_x - |\phi_x^i - \phi_x^q|) \cdot (l_{mag} \cdot \Delta k \cdot \Delta x^q) \right)^2 \\
&= \frac{1}{43} \cdot \sum_{i=1}^{43} \left(\frac{\sqrt{\beta_x^i}}{2} \cdot \cos(\pi Q_x - |\phi_x^i - \phi_x^q|) \right)^2 \cdot \left(\frac{\sqrt{\beta_x^q} \cdot l_{mag} \cdot \Delta k}{\sin(\pi Q_x)} \right)^2 \cdot (\Delta x^q)^2 \\
&\sim (\Delta x^q)^2 \tag{5.11}
\end{aligned}$$

Für die y -Richtung gilt ein analoger Zusammenhang. Dieser Meßwert ist proportional zum Quadrat der Ablage Δx^q des Strahls von der Quadrupolachse. In Gleichung 5.11 wurden die einzelnen Beiträge zu diesem explizit separiert. Der erste Term, bestehend aus einer Summe über die 43 Meßpositionen, ist im wesentlichen durch die Optik der Beschleunigeranlage gegeben. Der Ort der Störung geht hier nur durch den Wert der Betatronphase bzw. der Phasenvorschübe zwischen diesem Ort und den Meßorten ein. Der zweite Faktor ist, bis auf die Abhängigkeit vom Q -Wert, nur durch Parameter am Ort der Störung bestimmt. Der Ausdruck $(\sqrt{\beta_{x,y}^q} \cdot l_{mag} \cdot \Delta k) / \sin(\pi Q_{x,y})$ wird im weiteren als generalisierter Kickparameter $\Delta\Theta_{x,y}$ bezeichnet, da er ein Maß für die zu erwartende Closed-Orbit-Störung darstellt.

Trägt man die mittlere quadratische Ablage gegen die im zu untersuchenden Quadrupol gemessene Strahllage auf, so erwartet man eine Parabel. In Abbildung 5.4 ist das Ergebnis einer solchen Messung abgebildet.

Der Elektronenstrahl wurde im Bereich von $-1,6\text{mm}$ bis $+1,6\text{mm}$ in Schritten von $0,4\text{mm}$ in horizontaler Richtung durch den Quadrupol QD-9, in dem BPM26 installiert ist, gefahren. An jeder Position x^q (x^q wird dabei im Koordinatensystem des Lagemeßsystems bestimmt) wurde jeweils eine Variation des k -Wertes ($k = 2,35 \cdot 1/\text{m}^2$) um $\Delta k = 5\%$ vorgenommen und die entstehende Orbitstörung gemessen, aus der dann die mittlere quadratische Ablage berechnet wurde. Man erhält eine Parabel, deren Scheitelpunkt die Lage der Quadrupolachse im Bezugssystem des Lagemeßsystems in der horizontalen Ebene angibt. Um diesen Wert zahlenmäßig zu bestimmen, wird an die Meßwerte nach dem Prinzip der Singular-Value-Decomposition (SVD [11]) eine Parabel

$$p(x^q) = a_x \cdot (x^q + b_x)^2 + c_x \tag{5.12}$$

angepaßt. Der Wert von $b_x = -0,40\text{mm}$ gibt den Offset des Scheitelpunktes der Parabel an und entspricht der Position der Achse des Quadrupolmagneten. Dieser kann dann bei allen weiteren Messungen der Strahllage an BPM26 zu dem Meßwert für die horizontale Strahllage addiert werden und ermöglicht somit die Lagemessung in bezug auf die Quadrupolachse. Der Faktor a_x ist bestimmt durch die Vorfaktoren in Gleichung 5.11 und proportional zu $(\Delta k)^2$, der Summand c_x

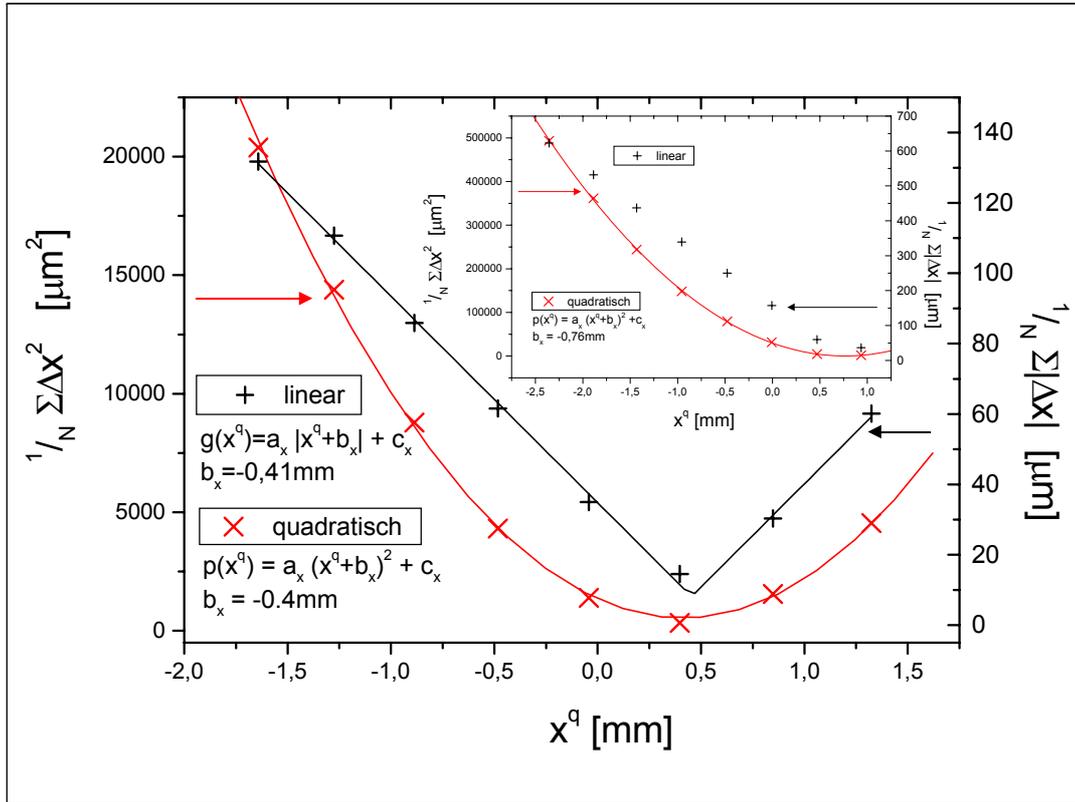


Abbildung 5.4: Beispiel für eine Kalibrationsmessung. Aufgetragen ist der quadratische Mittelwert der aus einer Variation der Quadrupolstärke resultierenden Orbit-Störung gegen die Ablage des Strahls im BPM. Man erhält eine Parabel, deren Scheitelpunkt die Position der Quadrupolachse im Referenzsystem des Lagemeßsystems angibt. Der Offset in Ordinaten-Richtung ist bestimmt durch das Auflösungsvermögen des Systems, die Steilheit der Kurve durch die Kickstärke. Ebenfalls aufgetragen wurde die mittlere absolute Ablage der Closed-Orbit-Störung. Der Schnittpunkt der resultierenden 2 Geraden ist, im Rahmen der numerischen Genauigkeit, gleich dem Scheitelpunkt der Parabel. In der kleineren Grafik ist eine Messung abgebildet, bei der die Position der Quadrupolachse am äußeren Rand des Meßbereichs liegt.

ist notwendig aufgrund der endlichen Auflösung des Meßsystems. Je kleiner der Wert von c_x ist, desto größer ist das Auflösungsvermögen.

Eine andere Vorgehensweise zur rechnerischen Bestimmung der Quadrupolachse besteht darin, die mittlere absolute Ablage

$$\begin{aligned} \overline{|\Delta x|} &= \frac{1}{43} \sum_{i=1}^{43} |\Delta x^i| \\ &\sim |\Delta x_q| \end{aligned} \quad (5.13)$$

aufzutragen und an die Meßwerte die Funktion

$$g(x^q) = a_x \cdot |x^q + b_x| + c_x \quad (5.14)$$

anzupassen. In Abbildung 5.4 ist auch das Ergebnis dieser Auswertung, wiederum für BPM26, dargestellt. Da beide auf den gleichen Meßdaten beruhen, erhält man für den Offset der Quadrupolachse, im Rahmen der numerischen Genauigkeit, gleiche Werte. Die Anpassung einer Parabel an die Meßwerte hat jedoch den Vorteil, daß diese auch dann ein Ergebnis liefert, wenn die Achse des Quadrupols außerhalb des bei der Kalibration erfaßten Bereichs liegt. In der kleinen, ebenfalls in Abbildung 5.4 enthaltenen Grafik ist dieser Fall für BPM44 (in Quadrupol QD1-4 installiert) dargestellt. Die Auswertung der Meßdaten mit dem Parabel-Fit erlaubt die Bestimmung des Offsets, ein Fit an die Funktion $g(x^q)$ war nicht sinnvoll möglich. Für die Auswertung der Meßdaten der Kalibrationsmessungen wurde daher im weiteren immer ein Parabel-Fit durchgeführt.

Bei der Durchführung der strahlgestützten Kalibration ist die Veränderung des k -Wertes so zu wählen, daß die resultierende Orbitstörung gut meßbar ist, d.h. mindestens eine Größenordnung größer ist als die Auflösung des Meßsystems. Andererseits ist zu beachten, daß eine Veränderung des k -Wertes eines einzelnen Quadrupols immer auch zu einer Veränderung der horizontalen und vertikalen Q -Werte gemäß folgender Gleichung, die nur für kleine Veränderungen des k -Wertes gültig ist, führt [8]:

$$\Delta Q_{x,y} = \frac{l_{mag}}{4\pi} \cdot \bar{\beta}_{x,y} \cdot \Delta k \quad (5.15)$$

$\bar{\beta}_{x,y}$ ist die mittlere Betafunktion des zu untersuchenden Quadrupols.

Die Variation Δk muß so gewählt werden, daß die Q -Werte nicht in den Bereich einer optischen Resonanz, die zu vollständigem Strahlverlust führen kann, geschoben werden. Der optimale Wert für Δk führt zu einer gut meßbaren Orbitstörung in der zu untersuchenden Ebene bei gleichzeitig akzeptabler Veränderung der Q -Werte in beiden Ebenen.

5.3 Komponenten des Systems zur strahlgestützten Kalibration

Zur Durchführung der strahlgestützten Kalibration des Lagemeßsystems nach der Quadrupol-Kick-Methode sind die folgenden Voraussetzungen zu erfüllen:

- Der k -Wert jedes Quadrupolmagneten, in den ein zu kalibrierender BPM eingebaut ist, muß individuell veränderbar sein.
- Ein System von Korrekturmagneten muß vorhanden sein, mit dem es möglich ist, den Elektronenstrahl gezielt in den zu untersuchenden Quadrupolmagneten in beiden transversalen Ebenen zu verschieben.

- Die aus dem k -Kick resultierende Orbitstörung muß mit hoher relativer Auflösung gemessen werden können.

Im folgenden soll auf die Gegebenheiten an DELTA im Detail eingegangen werden.

5.3.1 Situation an DELTA

Wie in Kapitel 4 eingehend beschrieben, ist an DELTA ein Strahllagemeißsystem installiert, das eine Messung der transversalen Strahllage an 43 BPMs mit einer relativen Auflösung von $\approx 5\mu m$ erlaubt. Von diesen 43 BPMs sind 40 in Quadrupolmagneten installiert, die somit nach der Quadrupol-Kick-Methode kalibriert werden können. Das zu kalibrierende System selbst ist somit wesentlicher Bestandteil der Anordnung zur Kalibration, seine Leistungsfähigkeit beeinflusst direkt die zu erreichende absolute Genauigkeit. In Kapitel 6 wird auf diese Abhängigkeit näher eingegangen.

Zur Closed-Orbit-Korrektur ist in DELTA ein System von horizontalen und vertikalen Korrekturmagneten installiert. Davon sind 28 für die horizontale und 24 für die vertikale Ebene vorgesehen. Für die Kickstärken der Korrekturmagnete gilt:

$$\Delta\theta_x[mrad] = \begin{cases} 0,391 \cdot \frac{I[A]}{E[GeV]} & (20 \text{ Korrekturmagnete}) \\ 0,336 \cdot \frac{I[A]}{E[GeV]} & (8 \text{ Korrekturmagnete}) \end{cases} \quad (5.16)$$

$$\Delta\theta_y[mrad] = 0,140 \cdot \frac{I[A]}{E[GeV]}$$

Diese sind alle mit identischen Netzgeräten ausgestattet, die eine Stromstärke von $\pm 10A$ liefern und somit bei einer Energie von $1,5GeV$ eine maximale horizontale Kickstärke von $2,61mrad$ und eine vertikale von $0,93mrad$ ermöglichen. Dieses System erlaubt es, mittels abgeschlossener 3er-Beulen (die dazu notwendige Software steht im Kontrollsystem der Beschleunigeranlage zur Verfügung [42]) den Strahl lokal in beiden Ebenen durch den zu untersuchenden Quadrupol zu steuern. Die Kickstärken der beteiligten Korrekturmagnete werden dabei so gewählt, daß die Ablage des Strahls am Ort des zu untersuchenden Quadrupolmagneten frei eingestellt werden kann, während außerhalb des Bereichs der Korrekturmagnete der Orbit ungestört ist. Der erzielte minimale Hub in beide Richtungen ist bei maximaler Energie ca. $\pm 2mm$.

An DELTA sind insgesamt 74 Quadrupolmagnete eingesetzt. Diese sind gemäß ihrer Funktion in der Strahloptik in 23 Familien gruppiert, die jeweils den gleichen k -Wert aufweisen und werden von insgesamt 30 Netzgeräten versorgt (Abbildung 4.2). Alle eingesetzten Netzgeräte sind identisch. Sie ermöglichen

bei einer Spannung von $120V$ einen maximalen Ausgangsstrom von $60A$, der mit einer relativen Genauigkeit von $< 10^{-4}$ gesetzt werden kann. Der k -Wert eines Quadrupols läßt sich aus dem stromabhängigen Gradienten g des Quadrupols und der Energie der zu speichernden Elektronen wie folgt berechnen (für $\gamma \gg 1$):

$$k = \frac{e \cdot c}{E} \cdot g \quad (5.17)$$

bzw. als Größengleichung geschrieben

$$k \left[\frac{1}{m^2} \right] = \frac{0,2998}{E[GeV]} \cdot g \left[\frac{T}{m} \right] \quad (5.18)$$

Zu berücksichtigen ist, daß zwischen dem Erregungsstrom I und dem Gradienten g des Quadrupols nur bis zu einem Stromwert von ca. $35A$ ein linearer Zusammenhang besteht. Bei größeren Strömen wird dieser aufgrund von Sättigungseffekten im Magneteisen nichtlinear, und der Gradient des Quadrupols steigt weniger stark mit dem Strom an [43]. Für den Betrieb von DELTA bedeutet dies, daß ab einer Energie der gespeicherten Elektronen von $1,2GeV$ Sättigungseffekte bei der Einstellung der Quadrupolströme berücksichtigt werden müssen [23].

An DELTA werden 2 Arten von Quadrupolmagneten eingesetzt, die sich lediglich in ihrer Länge unterscheiden. Die wesentlichen Parameter dieser Quadrupole sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

	<i>langer</i> Quadrupol	<i>kurzer</i> Quadrupol
magnetische Länge	$0,435m$	$0,234m$
Ohmscher Widerstand (bei $50^\circ C$)	$0,772\Omega$	$0,551\Omega$
Induktivität	$1,00H$	$0,54H$
Gradient g^7 / Erregerstrom	$0,3777 \frac{T}{m \cdot A}$	$0,3777 \frac{T}{m \cdot A}$
Quadrupolmagnete pro Netzgerät	2	4

Mit der vorhandenen Hardware ist es daher nicht möglich, den k -Wert eines einzelnen Quadrupolmagneten zu verändern, da jeweils 4 oder 2 Magnete an einem Netzgerät angeschlossen sind. Zur Durchführung von strahlgestützten Kalibrationsmessungen ist daher die Installation zusätzlicher Hardware notwendig.

5.3.2 Hardware zur individuellen Variation der Quadrupolstärken

Um an einem Quadrupol, der zusammen mit anderen Quadrupolmagneten in Serie mit einem Netzgerät verbunden ist, individuell den Strom zu verändern

⁷Unterhalb der Sättigung, d.h. bis zu ca. $35A$.

und damit den k -Wert zu erhöhen oder zu reduzieren, gibt es prinzipiell zwei verschiedene Möglichkeiten.

Man kann einen Shuntwiderstand R_S geeigneter Dimensionierung mittels eines Halbleiter-Relais, das ferngesteuert vom Kontrollsystem aus bedient wird, parallel zum Quadrupol mit dem Widerstand R schalten. Durch die Stromregelung des Hauptnetzgerätes des Quadrupolkreises bleibt der Strom I im Gesamtkreis konstant und für die relative Veränderung des k -Wertes im Quadrupol gilt (bei konstanter Energie der gespeicherten Teilchen)

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta I}{I} = \frac{R}{R + R_S} \quad (5.19)$$

An einem *kurzen* Quadrupol ist zum Beispiel ein Widerstand von $4,96\Omega$ zu wählen, um dessen k -Wert um 10% zu reduzieren. Nachteil dieser Methode ist, daß die k -Variation durch die Dimensionierung des Widerstandes R_S im vorhinein festgelegt werden muß. Eine individuelle Optimierung des Wertes ist nur schwer möglich und erfordert immer den Austausch des Widerstandes. An einer Anlage wie DELTA, die es erlaubt, verschiedene Beschleunigeroptiken einzustellen, welche am selben Quadrupol unterschiedliche k -Werte erfordern, ist jedoch eine individuelle Anpassung notwendig. Weiterhin führt das Schalten des Shunts über ein Relais zu einer Veränderung des Gesamtwiderstands des Quadrupolkreises gemäß einer Stufenfunktion. Das Hauptnetzgerät des Quadrupolkreises reagiert daher im Sinne einer Sprungantwort auf die Systemstörung, was zu Regelschwingungen führen kann, die den Strom im Gesamtkreis über einen längeren Zeitraum vom Sollwert abweichen lassen. Dadurch wird der Zeitraum, bis der Strom im Hauptkreis wieder seinen Sollwert erreicht und eine Messung der resultierenden Orbitstörung möglich ist, verlängert.

An DELTA wurde daher der andere Weg beschritten. In Abbildung 5.5 ist die Schaltung am Beispiel der ersten 4 Quadrupole der Quadrupolfamilie QD, die von einem Netzgerät gespeist werden, dargestellt.

Dem Quadrupol, dessen k -Wert verändert werden soll, wird ein Zusatznetzgerät parallel geschaltet. Dessen Anschlußklemmen müssen potentialfrei ausgeführt sein, um ein Abfließen des Stroms aus dem Hauptkreis über das Netzgerät zu verhindern. Mit Hilfe dieses Netzgerätes kann durch den angeschlossenen Quadrupol ein zusätzlicher Strom ΔI geschickt werden, der zu einer Veränderung des k -Wertes um $\Delta k = k \cdot \Delta I / I$ führt.

Bei der maximalen Energie von $1,5\text{GeV}$ beträgt der maximale Erregungsstrom eines Quadrupolkreises an DELTA 50A . Der Spannungsabfall an einem volleregten *langen* Quadrupol beträgt im heißen Zustand nach mehreren Stunden Betrieb ca. 50V . Da für die Durchführung der strahlgestützten Kalibrationsmessungen eine Veränderung der k -Werte von 10% ausreichend ist, wurde als Zusatznetzgerät ein unipolares Gerät der Firma Delta Elektronika mit einem maximalen Ausgangsstrom von 10A bei einer maximalen Klemmenspannung von 70V ausgewählt. Dieses kann über eine analoge 10V -Schnittstelle ferngesteuert stromge-regelt betrieben werden. Vorteil dieser Anordnung ist, daß die Veränderung der k -Werte frei wählbar erfolgen und dem jeweiligen k -Wert des Quadrupols und der Beschleunigeroptik angepaßt werden kann.

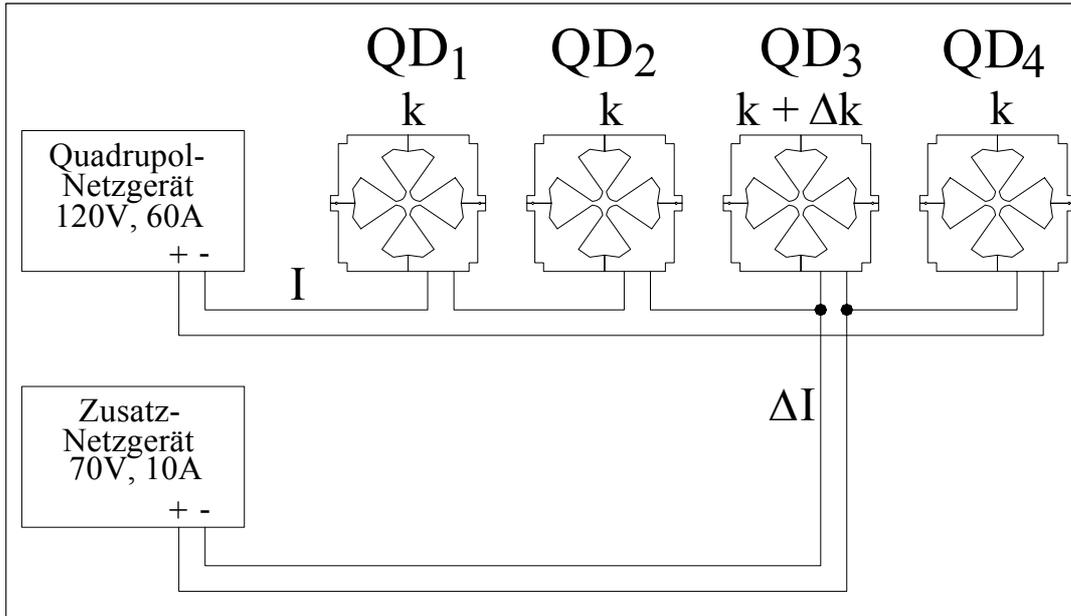


Abbildung 5.5: Schematische Abbildung der Schaltung zur Variation des k -Wertes eines individuellen Quadrupols. Typischerweise sind je 4 kurze Quadrupole in Serie mit dem Hauptnetzgerät geschaltet, die mit dem Strom I erregt werden. Durch Parallelschaltung eines Zusatznetzgerätes mit potentialfreien Ausgängen kann ein zusätzlicher Strom von ΔI durch den entsprechenden Quadrupol geleitet und damit dessen k -Wert um Δk verändert werden. Die Stromregelung des Hauptnetzgerätes hält dabei die k -Werte der 3 anderen Magnete konstant.

Da eine Ausrüstung aller Quadrupole mit Zusatznetzgeräten sehr aufwendig ist und die hier eingesetzte statische Meßmethode eine gleichzeitige Messung an verschiedenen Quadrupolen nicht erlaubt, wurde an DELTA folgende Lösung realisiert: Alle Quadrupole sind mit zusätzlichen Anschlußkabeln ausgestattet, die für jeden Halbring zentral an einem 19"-Schrank zusammengeführt sind (Abbildung 4.2). Für die Durchführung der Kalibrationsmessungen wäre eine Verkabelung der Quadrupole, in die Strahlagementore eingebaut sind, ausreichend. Da diese Installation noch andere Messungen ermöglicht (Abschnitt 6.4), wurden alle Quadrupole mit Zusatzkabeln ausgestattet. Verwendet wird ein zweiadriges Kabel mit 4mm^2 Leiterquerschnitt, um den Leitungswiderstand möglichst gering zu halten.

In diesen beiden 19"-Schränken wurde je eine Relaiskaskade in Form eines binären Baumes installiert, die es erlaubt, jeden Quadrupolmagneten mit nur einem, ebenfalls in diesem Rack installierten, Zusatznetzgerät zu verbinden. In Abbildung 5.6 ist die Installation schematisch abgebildet.

Der Aufbau als binärer Baum wurde gewählt, da er inhärent sicher ist gegen Fehlbedienungen. Jedes Bit-Muster repräsentiert genau eine Verbindung des Netzgerätes mit einem Quadrupol, daher ist es ausgeschlossen, daß es zu einem

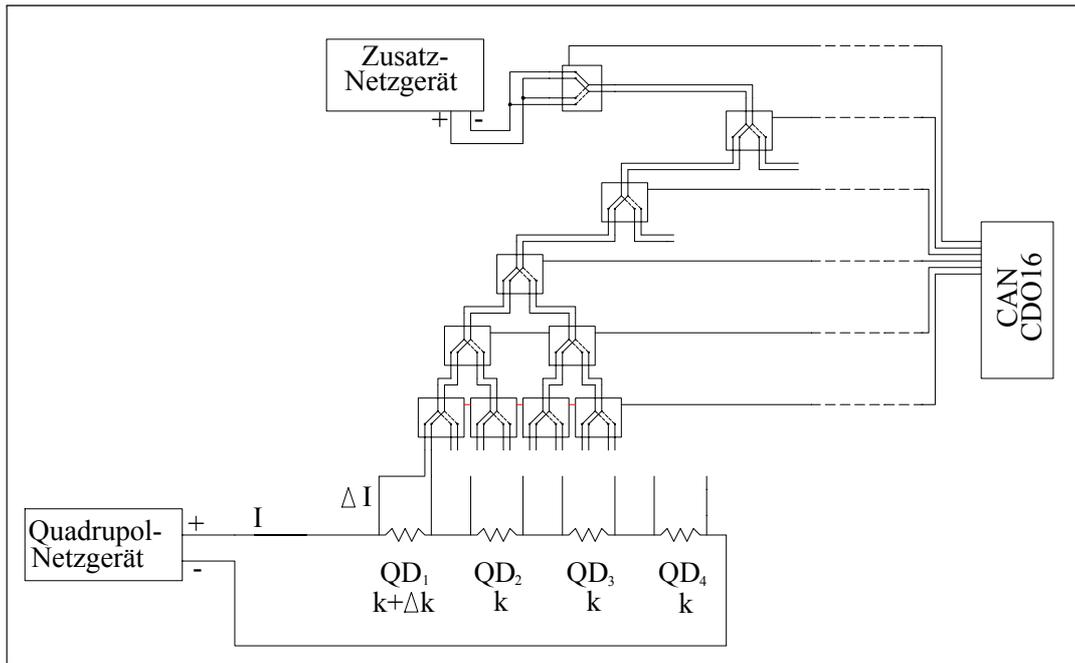


Abbildung 5.6: Jeder Quadrupolmagnet eines Halbrings von DELTA ist über die abgebildete Relaiskaskade mit dem Zusatznetzgerät zur individuellen Variation der k -Werte verbunden. Die Kaskade ist in Form eines binären Baumes realisiert, zur Auswahl der 37 Quadrupole eines Halbrings sind 6Bit notwendig, ein weiteres Relais ist direkt hinter dem Netzgerät als Polwender installiert, um die Polarität des Netzgerätes an die wechselnde Polarität des Hauptnetzgerätes einzelner Quadrupole in verschiedenen Beschleunigeroptiken anzupassen.

Kurzschluß zwischen verschiedenen Quadrupolkreisen kommt. Es ist allerdings darauf zu achten, daß ein Schalten der Relaiskaskade bei gleichzeitigem Stromfluß durch das Zusatznetzgerät unter allen Umständen vermieden wird. Aufgrund der hohen Induktivität der Quadrupole wird durch die Unterbrechung des Stromflusses eine hohe Spannung über die Relaiskontakte induziert, die zu einem Verbrennen der Kontakte und damit einer Zerstörung des Relais führen kann. Das Relais direkt hinter dem Zusatznetzgerät dient als Polwender, um die Polarität des Netzgerätes an die in verschiedenen Beschleunigeroptiken wechselnden Polaritäten einzelner Quadrupolkreise anzupassen. Die Ansteuerung des Netzgerätes wird über ein CAN-Modul mit analogem Ausgang und Eingang realisiert, daß sowohl eine Sollwert-Vorgabe, als auch eine Istwert-Rücklese mit 12Bit-Auflösung erlaubt; die Auswahl des Quadrupols über die Relaiskaskade erfolgt durch ein CAN-Modul mit digitalen 24V-Ausgängen.

5.3.3 Test der Komponenten

Um die Funktionsweise der Relaiskaskade und das Schalten des Zusatzstromes zu untersuchen, wurden Testmessungen durchgeführt. Dazu wurde der Quadrupolfamilie QD2, die aus vier kurzen Quadrupolen besteht, ein Stromwert von $15A$ vorgegeben. Dem Quadrupol QD2-1 wurde über die Relaiskaskade mit dem Zusatznetzgerät ein zusätzlicher Strom von $2A$ aufgeprägt. Während des Schaltvorgangs wurde sowohl der Strom durch die Quadrupolfamilie QD2 als auch der Strom durch den einzelnen Quadrupol QD2-1 mit Hilfe einer Strommeßzange oszillografiert. Für die Meßwerte dieser Stromzange gilt $1V \triangleq 10A$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

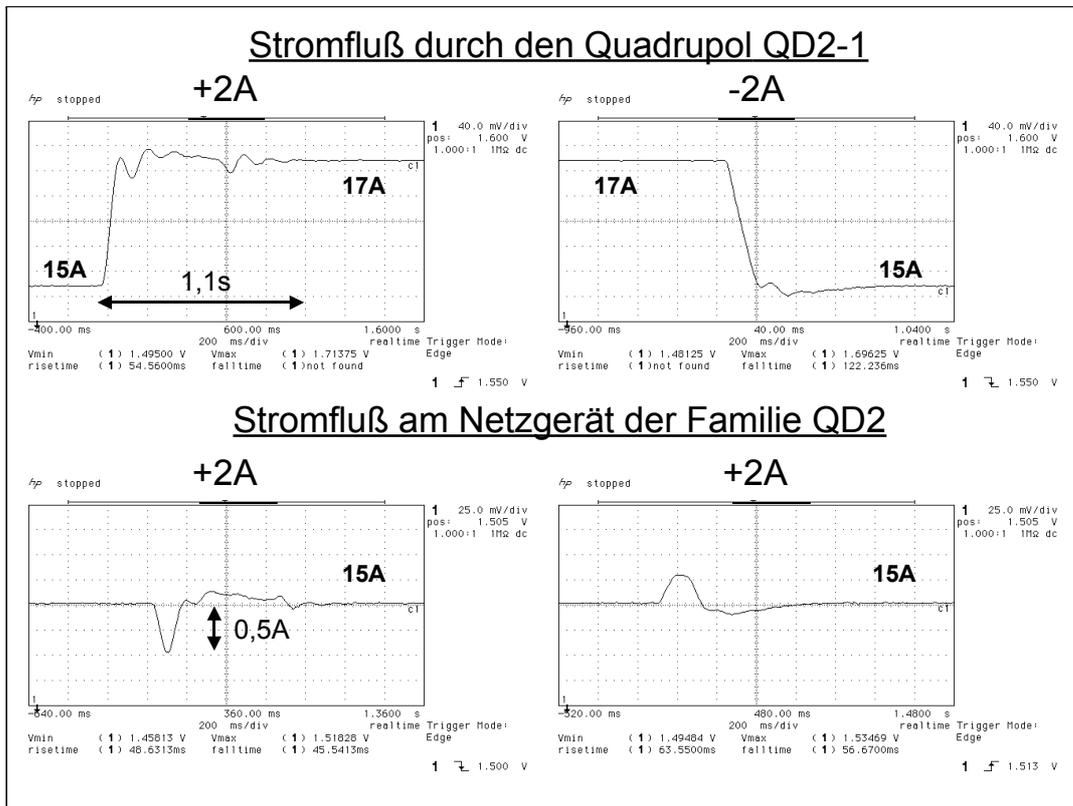


Abbildung 5.7: Variation des k -Wertes an Quadrupol QD2-1 um 13% mittels eines parallel geschalteten Zusatznetzgerätes. Abgebildet ist der Stromfluß durch die Familie QD2, der Sollwert beträgt $15A$, und durch den Quadrupol QD2-1 für das Setzen und Wegnehmen eines Zusatzstromes von $2A$. Man erkennt, daß nach einigen Regelschwingungen der Stromwert des selektierten Quadrupols den Endwert von $17A$ nach $1,1s$ erreicht. Die Störung des Stromwertes im Gesamtkreis beträgt maximal 25% des Wertes des Zusatzstromes.

Man erkennt, daß der Stromwert im selektierten Quadrupol QD2-1 nach einigen Regelschwingungen in ca. $1,1s$ den stationären Endwert von $17A$ erreicht. Beim Abschalten des Zusatzstromes vergeht ebenfalls ca. $1s$ bis der Endwert von

15A erreicht ist. Der Strom durch die anderen Quadrupole der Familie fällt kurz nach dem Setzen des Zusatzstromes für ca. 200ms um den Betrag von 25% des Wertes des Zusatzstromes ab. Beim Abschalten des Zusatzstromes verhält es sich ähnlich, der Strom steigt hier kurz an.

Die aus dem veränderten Gesamtstrom durch die Familie QD2 resultierende zusätzliche Verschiebung des Q -Wertes des Speicherrings liegt somit in der gleichen Größenordnung wie die durch die Messung zur Kalibration erzeugte. Der k -Wert der einzelnen Quadrupole wird zwar nur um $1/4$ des Wertes, der dem zu untersuchenden Quadrupol aufgeprägt wird, verändert. Insgesamt sind aber 3 Quadrupole, mit in Summe der dreifachen magnetischen Länge, betroffen (Gleichung 5.15). Bei korrekter Wahl der k -Wert-Veränderung ist daher eine Beeinflussung des Betriebes durch die kurzfristige Veränderung des Stroms durch die Quadrupolfamilie nicht zu erwarten.

Bei der Kalibrationsmessung ist lediglich darauf zu achten, daß Orbitmessungen nicht früher als 2s nach dem Schalten des Zusatzstroms durchgeführt werden, da erst dann die Stromverteilung im Quadrupolkreis einen stationären Zustand erreicht hat.

Kapitel 6

Ergebnisse der Kalibrationsmessungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen mit dem System zur strahlgestützten Kalibration des Lagemeßsystems präsentiert. Im ersten Abschnitt wird die Durchführung der Kalibrationsmessungen detailliert beschrieben sowie die Ergebnisse von Testmessungen und die Leistungsfähigkeit des Systems diskutiert.

Anschließend werden die Ergebnisse von Kalibrationsmessungen des Lagemeßsystems vorgestellt, die von März 1998 bis März 1999 durchgeführt wurden und Messungen zum Einfluß der so bestimmten Offsets bei der Orbit-Korrektur auf die Betriebsparameter von DELTA gezeigt.

Die für die strahlgestützte Kalibration geschaffene Möglichkeit, den k -Wert einzelner Quadrupole gezielt ändern zu können, erlaubt die Durchführung weiterer Messungen, die zum Abschluß des Kapitels beschrieben werden.

6.1 Durchführung der Kalibrationsmessungen

Zur Durchführung der Kalibration wurde eine Tcl/Tk-Applikation [24] mit grafischer User-Schnittstelle entwickelt, die eine halbautomatische Durchführung der Kalibrationsmessungen ermöglicht. Als Parameter erwartet dieses Programm die Angabe des zu kalibrierenden BPM und den Namen der Datei, in der die Meßergebnisse abgelegt werden sollen. Nach Übergabe des BPM-Namens entnimmt das Programm aus einer Steuerdatei den Namen des Quadrupols, in den der zu kalibrierende BPM eingebaut ist und die der Korrekturmagnete, aus denen die entsprechende horizontale bzw. vertikale 3er-Beule zur Lagevariation des Elektronenstrahls im BPM aufgespannt werden soll. Die Lagevariation wird standardmäßig im Bereich von $\pm 2mm$ in Schritten von $0,4mm$ durchgeführt, wenn nicht vom Anwender andere Werte vorgegeben werden.

Weiterhin wird von dem Programm für jeden BPM eine Vorgabe für die prozentuale Variation $\Delta k_{x,y}[\%]$ des k -Wertes des entsprechenden Quadrupols ge-

macht, die ebenfalls vom Anwender geändert werden kann. Die vom Programm vorgeschlagene Veränderung $\Delta k_{x,y}[\%]$ ist so gewählt, daß für jeden Quadrupol der gleiche generalisierte Kickparameter eingestellt wird, der im Vorfeld der Messungen festgelegt wurde (Abschnitt 6.2.1). Da für die absolute Veränderung des k -Wertes $\Delta k_{x,y} = k \cdot \Delta k_{x,y}[\%]/100$ gilt, läßt sich der generalisierte Kickparameter wie folgt schreiben (Gleichung 5.11):

$$\Delta\Theta_{x,y} = \frac{\sqrt{\beta_{x,y}^q} \cdot l_{mag} \cdot \Delta k_{x,y}[\%] \cdot k}{100 \cdot \sin(\pi Q_{x,y})} \quad (6.1)$$

Die Werte für $\beta_{x,y}^q$, l_{mag} und k sind ebenfalls in der Konfigurationsdatei für jeden Quadrupol enthalten. Die Q -Werte sind konstant und in der für die jeweilige Optik gültigen Steuerdatei als allgemeine Parameter abgelegt. Bei vorgegebenen generalisiertem Kickparameter $\Delta\Theta_{x,y}$ läßt sich die optimale relative k -Wert-Variation für die Kalibrationsmessungen wie folgt berechnen:

$$\Delta k_{x,y}[\%] = 100 \cdot \frac{\Delta\Theta_{x,y} \cdot \sin(\pi Q_{x,y})}{\sqrt{\beta_{x,y}^q} \cdot l_{mag} \cdot k} \quad (6.2)$$

Sind alle notwendigen Parameter eingegeben bzw. vom Anwender akzeptiert, kann die Kalibration des ausgewählten BPM in der horizontalen oder vertikalen Ebene gestartet werden. Das Programm führt die folgenden Schritte aus:

1. Der Stromwert I^q der Quadrupolfamilie des Quadrupols, in den der zu kalibrierende BPM eingebaut ist, wird ausgelesen und aus dem Wert für die relative k -Wert-Variation der Stromwert $\Delta I^q = I^q \cdot \Delta k[\%]/100$ für das Zusatznetzgerät berechnet. Dies ist möglich, da der k -Wert proportional zum Erregungsstrom des Quadrupols bei konstanter Energie der Elektronen ist.¹
2. Das Programm stellt sicher, daß kein Strom durch das Zusatznetzgerät fließt und verbindet den ausgewählten Quadrupol über die Relaiskaskade mit dem Zusatznetzgerät.
3. Die 3er-Beule zur Verschiebung des Elektronenstrahls im Lagemonitor wird initialisiert und mittels dieser Beule der Strahl zum Startwert der Kalibrationsmessung gefahren.
4. Das Fahren der Beule erfordert die synchrone Ansteuerung der Netzgeräte der 3 beteiligten Korrekturmagnete. Da die Geschwindigkeit, mit der

¹Wie in Abschnitt 5.3 erwähnt, wird der Zusammenhang zwischen Gradient g und damit auch des k -Wertes und dem Erregungsstrom der Quadrupole ab 35A zunehmend nichtlinear. Während dieser Effekt bei der Einstellung der Beschleunigeroptik unbedingt berücksichtigt werden muß, ist er für die Durchführung der Kalibrationsmessungen unbedeutend, und es kann weiterhin ein proportionaler Zusammenhang benutzt werden. Lediglich bei sehr hohem Erregungsstrom einer Quadrupolfamilie ist es notwendig, die Stromvariation zur Erzielung eines bestimmten Quadrupol-Kicks etwas größer als vorhergesagt einzustellen.

Stromvariationen an den Korrekturspulenetzgeräten gesetzt werden können, durch die gewählte Kontrollsystemanbindung der Netzgeräte limitiert ist, überprüft das Programm, ob der Elektronenstrahl im ausgewählten BPM eine feste Position erreicht hat. Dies kann in Abhängigkeit vom Fahrweg der Beule bis zu 20s dauern.

5. Der Closed-Orbit wird an allen verfügbaren Strahllagemonitoren gemessen und zwischengespeichert. Die Meßzeit beträgt ca. 1s.
6. Der Strom ΔI^q wird über das Zusatznetzgerät auf den Strom durch den ausgewählten Quadrupol addiert und damit dessen k -Wert um den gewünschten Betrag verändert.
7. Nach 2s ist die Stromverteilung in der entsprechenden Quadrupolfamilie stationär und ein neuer Closed-Orbit, resultierend aus dem Quadrupol-Kick, wird zwischengespeichert.
8. Aus den Closed-Orbit-Messungen vor und nach Setzen des Zusatzstromes werden für die horizontale und die vertikale Ebene die Werte für die mittlere quadratische Orbitstörung $\overline{\Delta x^2} = 1/43 \cdot \sum_{i=1}^{43} (\Delta x^i)^2$ und die mittlere absolute Orbitstörung $|\overline{\Delta x}| = 1/43 \cdot \sum_{i=1}^{43} |\Delta x^i|$ berechnet.
9. Die Werte für die Strahlage am Ort des zu kalibrierenden BPM vor dem Quadrupol-Kick werden zusammen mit den Meßwerten für $\overline{\Delta x^2}$ und $|\overline{\Delta x}|$ in einer Datei abgespeichert. Zusammen mit diesen Daten wird auch der Wert für die relative Veränderung $\Delta k[\%]$ des k -Wertes abgelegt.
10. Schritt 4 bis 9 werden für alle Strahlpositionen zwischen Start- und Zielwert der Strahlagevariation wiederholt.
11. Ist die Messung für die letzte Strahlposition abgeschlossen, wird die Beule wieder ausgeschaltet und die Netzgeräte der beteiligten Korrekturmagnete freigegeben.
12. Ist der Strom durch das Zusatznetzgerät Null, wird das Netzgerät von dem ausgewähltem Quadrupol getrennt.

Damit ist die Kalibrationsmessung in der ausgewählten Ebene des BPM abgeschlossen. Die nächste Messung kann durchgeführt werden.

Die Auswertung der Kalibrationsmessungen erfolgt ebenfalls halbautomatisch mittels eines in Tcl/Tk geschriebenen Programms. Dieses benutzt zur Bestimmung der Offsets ein C-Programm, daß den Fit nach der SVD-Methode (eine besondere Art der χ^2 -Anpassung) durchführt. Dazu werden die Dateien mit den Meßdaten, die anhand des BPM-Namens und des Suffix x für die horizontale Ebene und y für die vertikale Ebene identifiziert werden, in ein Unterverzeichnis kopiert und das Auswertungsprogramm gestartet. Dieses fittet an jeden Datensatz die Parabelfunktion $p(x^q) = a_x \cdot (x^q + b_x)^2 + c_x$ und entscheidet anhand des Suffix, welche Ebene kalibriert wurde. Alternativ kann auch ein Fit an die

Geradenfunktion $g(x^q) = a_x \cdot |x^q + b_x| + c_x$ durchgeführt werden; wie aber schon in Abschnitt 5.2.1 bemerkt, wird für die Auswertung der in Serie durchgeführten Kalibrationsmessungen an allen BPMs standardmäßig der Parabelfit gewählt. Als Ergebnis erhält man eine Datei, in der für alle Strahllagemonitore die Fitparameter zusammen mit ihren Varianzen $a_x \pm \sigma_{a_x}$, $b_x \pm \sigma_{b_x}$ und $c_x \pm \sigma_{c_x}$ abgelegt sind. Zusätzlich wird der Bewertungsfaktor Q des Fits abgespeichert. Dieser gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die den Meßwerten zugrundeliegende Funktion der gewählten Fitfunktion entspricht und kann somit als Maß für die Güte des Fits dienen. Die Praxis zeigt, daß Werte von Q größer 0,2 für eine gute Anpassung der Fitfunktion an die Meßwerte sprechen und der Fit verlässliche Parameter liefert. Bei kleineren Werten sind die Meßdaten und das Ergebnis des Fits zu überprüfen.

Um eine Überprüfung zu erleichtern, wird von dem Auswerteprogramm eine Steuerdatei für das Datenvisualisierungsprogramm gnuplot² angelegt. Dieses ermöglicht die Darstellung der Meßdaten aller Kalibrationsmessungen zusammen mit den an diese angepaßten Funktionen. Auf diese Weise fällt es leicht, fehlerhafte Messungen und Meßwerte zu identifizieren und ggf. die Messung zu wiederholen.

6.2 Test des Kalibrations-Systems

Bevor Kalibrationsmessungen am gesamten Lagemeßsystem stattfanden, wurden Testmessungen an einigen ausgewählten Strahllagemonitoren durchgeführt. Ziel dieser Messungen war es, einen Wert für den generalisierten Kickparameter festzulegen, den Einfluß äußerer Parameter auf die Kalibration der Monitore zu untersuchen und Aussagen über die erreichbare Auflösung der Kalibration in bezug auf die Achsen der Quadrupolmagnete zu treffen.

6.2.1 Einfluß des generalisierten Kick-Parameters

Um den Einfluß des generalisierten Kickparameters $\Delta\Theta_{x,y}$ auf die Kalibrationsmessungen zu untersuchen, wurde die Messung an BPM40 für die horizontale Ebene 5 mal wiederholt und bei jeder Messung der Wert von $\Delta\Theta_x$ verdoppelt. BPM40 ist in den *kurzen* Quadrupol QD-15 der Familie QD eingebaut, für den die folgenden Parameter gelten: $\beta_x^q = 3,02m$, $l_{mag} = 0,234m$ und $k = 2,35 \cdot 1/m^2$. Der horizontale Q-Wert lag während der Messung bei $Q_x = 8,805$.

Um eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse zu erhalten, wurden in Abbildung 6.1 der Wert von $|\Delta x|$ gegen den Meßwert x^q der Strahlposition aufgetragen und die Geradenfunktion $g(x^q) = a_x \cdot |x^q + b_x| + c_x$ an die Meßwerte angepaßt. In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Parameterfits für die verschiedenen Werte der Kickparameter aufgetragen. Ebenfalls eingetragen

²Programm zur Darstellung von Meßdaten, daß nicht nur interaktiv arbeitet sondern auch mittels Steuerdateien bedient werden kann.

ist die erwartete Verschiebung ΔQ_x des horizontalen Q -Werts. Der Bewertungsfaktor Q war für alle Fits größer 0,4.

Nr.	$\Delta k[\%]$	$\Delta\Theta_x [1/m^{1/2}]$	Offset $b_x [mm]$	Steigung $a_x [\mu m]$	ΔQ_x
1	1	0,0166	$-0,45 \pm 0,33$	$10,1 \pm 4,9 (= a_1)$	0,0013
2	2	0,0333	$-0,41 \pm 0,17$	$21,5 \pm 6,6 (= 2,2 \times a_1)$	0,0026
3	4	0,0665	$-0,405 \pm 0,077$	$44,8 \pm 4,7 (= 4,4 \times a_1)$	0,0053
4	8	0,133	$-0,382 \pm 0,036$	$87,8 \pm 5,7 (= 8,7 \times a_1)$	0,011
5	16	0,266	$-0,396 \pm 0,018$	$158 \pm 4,6 (= 15,6 \times a_1)$	0,021

Man erkennt, daß wie vom Modell vorhergesagt die Steigung der angefitzten Geraden um etwa gleiche Faktoren wie der generalisierte Kickparameter anwächst. Der für jede Messung bestimmte Offset des Lagemeßsystems in bezug auf die Achse des Quadrupols ist im Rahmen der geforderten Meßgenauigkeit von $< 100\mu m$ für alle Messungen konstant. Die aus jedem Fit für den Offset bestimmte Varianz ist jedoch erst ab einem Wert von $\Delta\Theta_x > 0,07 \cdot 1/m^{1/2}$ kleiner als die geforderte absolute Genauigkeit. Für die weiteren Messungen wird für den generalisierten Kickparameter ein Wert von $> 0,1 \cdot 1/m^{1/2}$ angestrebt, da für diesen die Varianz des Offsets mindestens um den Faktor 2 kleiner als für die absolute Genauigkeit gefordert ist. Deutlich größere Werte führen zu größeren Verschiebungen des Q -Werts, für die im einzelnen geprüft werden muß, ob ein stabiler Betrieb der Beschleunigeranlage ohne Strahlverlust während der Kalibrationsmessungen möglich ist.

Im nächsten Schritt wurde an 4 verschiedenen BPMs Kalibrationsmessungen in der vertikalen Ebene durchgeführt. Die Veränderung des k -Wertes ist so gewählt, daß bei Berücksichtigung der individuellen Parameter des Quadrupols der gleiche generalisierte Kickparameter erreicht wurde. Die wesentlichen Parameter jeder Messung sowie der jeweils bestimmte Offset des Lagemeßsystems zusammen mit der Varianz können der folgenden Tabelle entnommen werden. Der vertikale Q -Wert betrug während der Messung $Q_y = 2,855$; daraus berechnet sich der bei jeder Messung gleich gewählte generalisierte Kickparameter zu $\Delta\Theta_y = 0,182 \cdot 1/m^{1/2}$.

	Quadrupol	$\Delta k[\%]$	$k [1/m^2]$	$\beta_y [m]$	Offset $b_y [mm]$
BPM13	Q5N-2	3,2	$-2,622$	16,63	$-0,208 \pm 0,022$
BPM14	Q1N-2	66,2	$-0,205$	6,37	$-0,336 \pm 0,031$
BPM17	QD-6	5,5	2,35	7,03	$-0,299 \pm 0,018$
BPM18	QD-7	5,5	2,35	7,03	$-0,270 \pm 0,018$

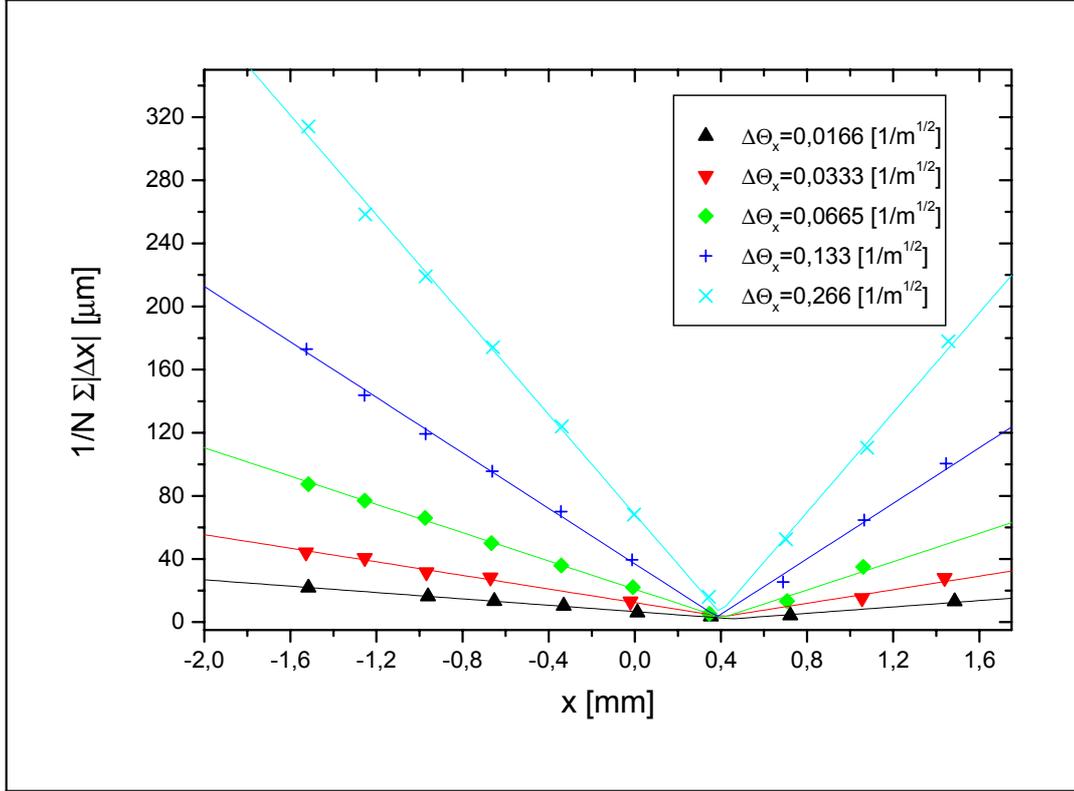


Abbildung 6.1: 5 Kalibrationsmessungen an BPM40 bei denen jeweils der Wert des generalisierten Kickparameters verdoppelt wurde. Die Parameter des Quadrupols QD-15, in dem BPM40 installiert ist, sind $\beta_x = 3,02m$, $l_{mag} = 0,234m$ und $k = 2,35 \cdot 1/m^2$. Der Q -Wert lag bei dieser Messung bei $Q_x = 8,805$. Um eine übersichtliche Darstellung der Meßergebnisse zu erzielen, wurden die Werte für die mittlere absolute Ablage aufgetragen. Man erkennt die gute Übereinstimmung aller Meßwerte mit der Modellfunktion $g(x^q) = a_x \cdot |x^q + b_x| + c_x$.

BPM17 und BPM18 sind in Quadrupolen mit identischen optischen Parametern installiert. Die Werte der Quadrupole von BPM13 und BPM14 entsprechen Extremalwerten der k -Werte und der Betafunktionen der während der Kalibrationsmessungen eingestellten DELTA006-Optik. In Abbildung 6.2 sind die Ergebnisse der Messungen abgebildet. Dabei wurde die y -Koordinate jeweils um den Offset der Lagemessung korrigiert, um alle Parabeln mit gleichem Scheitelpunkt bei $y = 0mm$ darzustellen und diese besser vergleichen zu können.

Man erkennt, daß trotz unterschiedlichster Betafunktionen und k -Werte der beteiligten Quadrupole, die Messungen zu ähnlichen mittleren quadratischen Ablagen führen. Die Abweichungen zwischen den Parabeln sind begründet in den unterschiedlichen Betatron-Phasenvorschüben zwischen den Meßorten der BPMs und dem Quadrupol, in dem der Kick erfolgt (erster Faktor aus Gleichung 5.11).

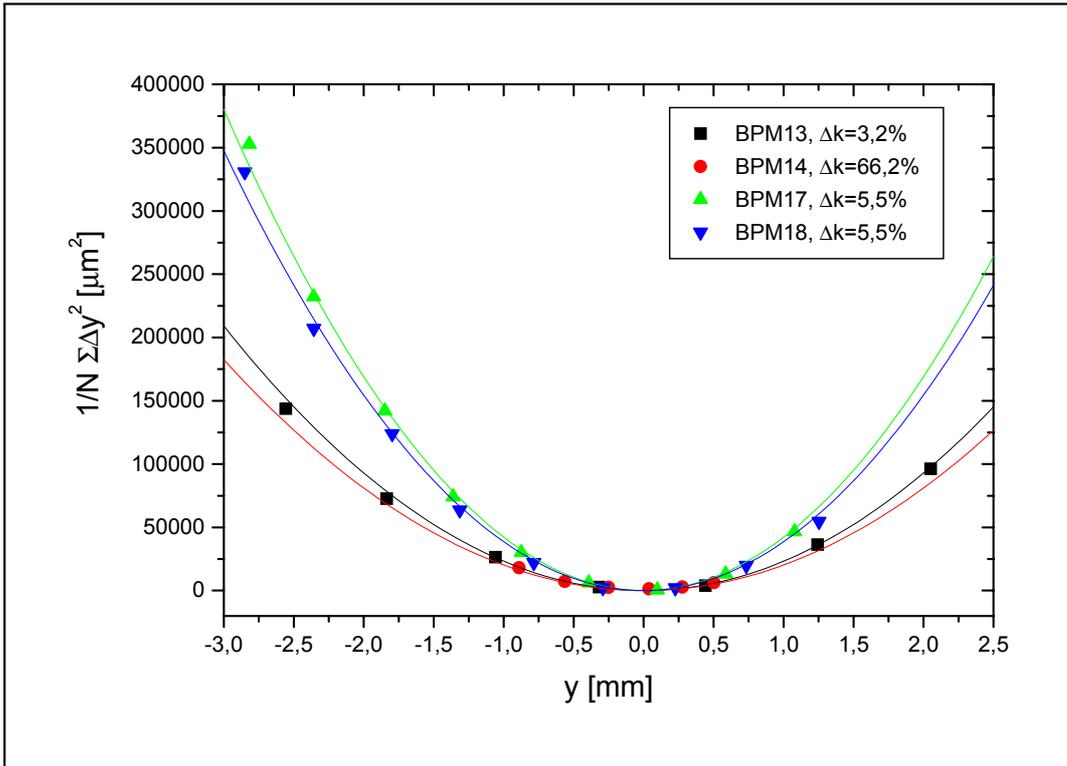


Abbildung 6.2: Kalibrationsmessung an 4 verschiedenen BPMs. BPM17 und BPM18 sind in Quadrupolen mit gleichen optischen Parametern installiert, die Parameter der Quadrupole von BPM13 und BPM14 entsprechen Extremalwerten der während dieser Messungen eingestellten DELTA006-Optik. Es sind die einzelnen Meßpunkte zusammen mit den an diese angepassten Parabeln dargestellt. Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, wurde die y-Koordinate um den jeweiligen Offset verschoben und alle Parabeln mit gleichem Scheitelpunkt dargestellt.

Durch die Festlegung auf einen konstanten Kickparameter ist sichergestellt, daß die Varianzen der berechneten Offsets nahezu gleich sind und damit die Messungen Ergebnisse gleicher Qualität liefern sowie die Amplituden der resultierenden Orbitstörung vergleichbar sind.

6.2.2 Einfluß des Closed-Orbits

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme einer Speicherringanlage - wenn es möglich ist, Teilchenstrahlen mit einer für eine hochauflösende Orbitmessung hinreichenden Intensität zu speichern - sollte die Kalibration des Strahlmeßsystems erfolgen, um eine gute Ausgangsbasis für die weitere Optimierung der Anlage zu schaffen. Damit der Bereich der Quadrupolmagnete, durch den der Elektronenstrahl zur Durchführung der Kalibrationsmessungen verschoben werden muß und in dem die Position der Quadrupolachse erwartet wird, möglichst klein und für

jeden zu kalibrierenden BPM gleich gewählt werden kann, wird vor Beginn der Messungen eine Orbit-Korrektur durchgeführt. Diese bringt den Strahl möglichst nah an den Design-Orbit der Speicherring-Anlage. Aufgrund der Ungewißheit in der Positionierung der Strahllagemonitore vom Typ *variabel* (Abschnitt 4.1) können dabei im ungünstigsten Fall Ablagen bis zu $1,7\text{mm}$ produziert werden. Dies führt dazu, daß der Elektronenstrahl den Quadrupolmagneten nicht achsenparallel passiert, sondern unter einem Winkel in diesen eintritt. Berücksichtigt man, daß an Anfang und Ende einer typischen Dipolvakuumkammer je ein BPM vom Typ *fixiert* ($< 0,07\text{mm}$ Positioniergenauigkeit in bezug auf die Quadrupolachse) und *variabel* installiert sind, läßt sich bei einer Bahnlänge des Elektronenstrahls zwischen den beiden BPM von 1890mm , eine Abschätzung für den maximalen Winkel von $\theta_{x,y} = (1,70\text{mm} + 0,07\text{mm})/1890\text{mm} \simeq 1\text{mrad}$ angeben.

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, sind die Strahllagemonitore in unmittelbarer Nähe zu kurzen Quadrupolmagneten installiert. Der Abstand der Ebene der Pickup-Elektroden von der Mitte des jeweiligen Quadrupolmagneten beträgt 125mm (Abbildung 4.3). Ein Teilchenstrahl, der die Mitte eines Quadrupols unter einem Winkel θ_x passiert, führt am BPM zu einer gemessenen Strahlposition von $x = 125\text{mm} \cdot \tan \theta_x \simeq 125\text{mm} \cdot \theta_x$. Da bei der Kalibrationsmessung nach der Quadrupolkickmethode der Winkel des Teilchenstrahls beim Durchgang durch den Quadrupol die Messung selbst nicht beeinflusst, führt ein Winkel von 1mrad bei einem im Quadrupol zentrierten Strahl zu einer Strahlage am zugehörigen BPM von $x = 125\text{mm} \cdot 1\text{mrad} = 125\mu\text{m}$. In der Realität ist der Zusammenhang komplexer, daher wurden Simulationen mit MAD durchgeführt. In diesen wurde jeweils eine Orbit-Korrektur unter der Annahme, daß die Lagemessung durch die noch unbekanntenen Offsets nicht in bezug auf die Quadrupolachsen erfolgt, durchgeführt. Gibt man einen maximalen Offset von $\pm 1.5\text{mm}$ vor, der gleichverteilt allen BPMs zugewiesen wird, so ergeben sich Abweichungen zwischen der Position des Elektronenstrahls in der Mitte des Quadrupols und der Position am dort installierten BPM von bis zu $150\mu\text{m}$. Der Mittelwert über alle Quadrupol-BPM-Kombinationen beträgt ca. $80\mu\text{m}$. Um diesen Einfluß auf die Kalibrationsmessungen zu verifizieren, wurden am BPM40 die folgenden Messungen durchgeführt:

Der BPM wurde, nach durchgeführter Orbit-Korrektur, in der horizontalen Ebene nach der Quadrupolkick-Methode kalibriert. Die optischen Parameter des zu BPM40 gehörenden Quadrupols sind in Abschnitt 6.2.1 aufgeführt. Es wurde für alle Messungen ein generalisierter Kickparameter von $\Delta\Theta_x = 0,17 \cdot 1/\text{m}^{1/2}$ eingestellt. Danach wurde mittels einer um den Quadrupol aufgespannten 3er-Beule der Winkel des Elektronenstrahls im Quadrupol um die Werte $-0,4\text{mrad}$, $-0,8\text{mrad}$ und $-1,2\text{mrad}$ verändert und die Kalibrationsmessung wiederholt. Die Meßergebnisse sind in Abbildung 6.3 dargestellt; die aus dem eingestellten Winkel berechnete Verschiebung des BPM-Offsets ist zusammen mit den aus der Kalibrationsmessung bestimmten in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

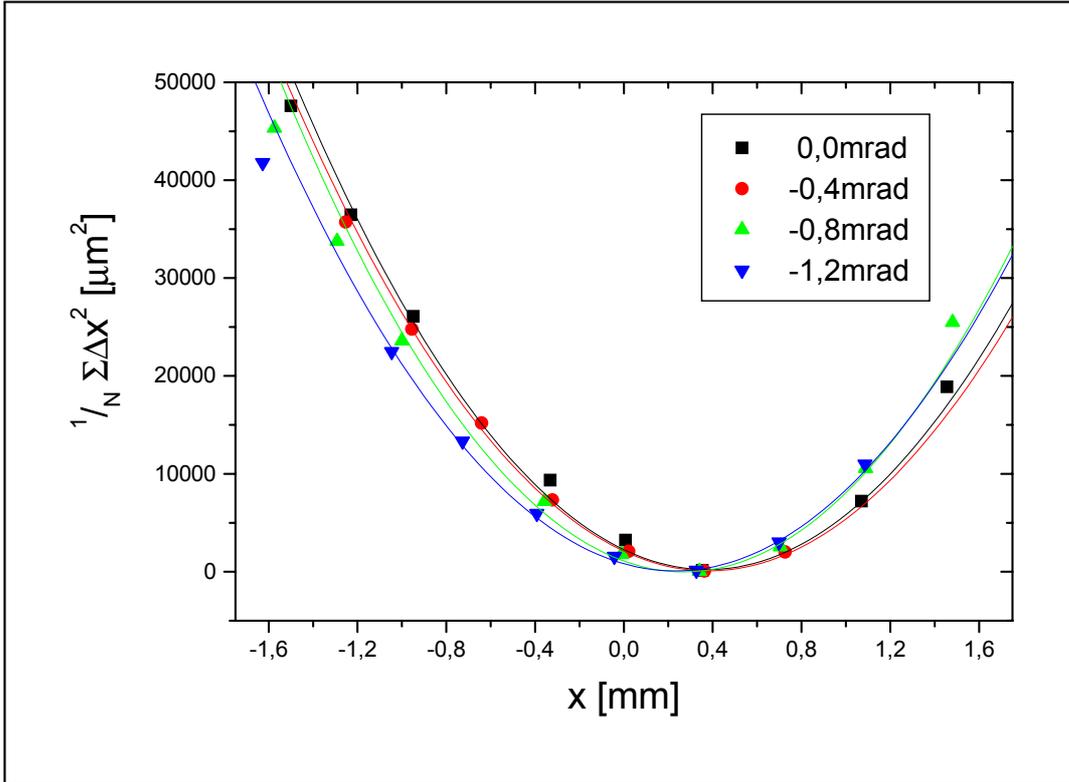


Abbildung 6.3: Kalibrationsmessungen an BPM40 bei verschiedenen Winkeln des Elektronenstrahls im Quadrupol. Dazu wurde bei korrigiertem Orbit BPM40 kalibriert und danach mittels einer um den BPM aufgespannten 3er-Beule der Winkel des Teilchenstrahls im Quadrupol auf die Werte $-0,4\text{mrad}$, $-0,8\text{mrad}$ und $-1,2\text{mrad}$ eingestellt und die Kalibration wiederholt. Man erkennt, wie sich mit wachsendem Winkel der gemessene Offset verschiebt. Der generalisierte Kickparameter betrug bei allen Messungen $\Delta\Theta_x = 0,17 \cdot 1/m^{1/2}$.

$\theta_x [\text{mrad}]$	$b_{x,\text{Meßwert}} [\mu\text{m}]$	$\Delta b_{x,\text{Meßwert}} [\mu\text{m}]$	$\Delta b_{x,\text{Theorie}} [\mu\text{m}]$
0	-375	0	0
-0,4	-381	-4	49
-0,8	-261	+112	98
-1,2	-235	+140	147

Man erkennt, daß bis auf die Messung bei einem Winkel von $-0,4\text{mrad}$, die abgeschätzte Verschiebung des Offsets gut mit der gemessenen übereinstimmt. Daraus läßt sich für die Durchführung der Kalibrationsmessungen ableiten, daß als erster Schritt vor einer Kalibration unbedingt eine Orbit-Korrektur zu erfolgen hat, um den Elektronenstrahl möglichst achsenparallel bezüglich der Quadrupole auszurichten. Die dem Lagemeßsystem vor Durchführung der ersten Kalibrati-

onsmessungen unbekanntem BPM-Offsets können jedoch zu Winkeln des Elektronenstrahls führen, die zu einem Meßfehler in der Offset-Bestimmung in der Größenordnung der geforderten Genauigkeit von $< 100\mu m$ führen. Bei der ersten Kalibration des Gesamtsystems ist daher iterativ vorzugehen.

Die in einem ersten Schritt bestimmten Offsets des Lagemeßsystems sind bei einer erneuten Orbit-Korrektur zu berücksichtigen. Der Meßfehler in bezug auf die Quadrupolachsen ist dann kleiner als $200\mu m$, und der aus diesen Ablagen resultierende Winkel des Elektronenstrahls beim Passieren der Quadrupolmagnete ist kleiner als $0,1\text{mrad}$. Daraus ergibt sich eine Unsicherheit in der Bestimmung der Offsets von nur noch ca. $10\mu m$.

Um dies zu verifizieren, wurde die oben beschriebene Simulation mit einem Offset von $\pm 150\mu m$, der wiederum allen BPMs gleichverteilt zugewiesen wurde, wiederholt. Die Abweichungen zwischen Strahllage im Quadrupol und Lagemesung im zugehörigen BPM liegt dann, wie abgeschätzt, in der Größenordnung von $10\mu m$.

6.3 Reproduzierbarkeit und Meßauflösung

Die relative Meßgenauigkeit des DELTA-Strahllagemeßsystems beträgt, wie in Abschnitt 4.4 dargelegt, $5\mu m$. Während der Durchführung der Kalibrationsmessungen hat sich gezeigt, daß der gespeicherte Elektronenstrahl zu bestimmten Zeiten in unregelmäßigen Abständen um den Closed-Orbit Schwingungen mit einer Frequenz von 50Hz und Amplituden von bis zu $200\mu m$ ausführt. Diese Schwingungen konnten zu unterschiedlichen Zeiten und auch während verschiedener Betriebsmodi von DELTA an allen Strahllagemonitoren detektiert werden, indem die von der Closed-Orbit-Elektronik gelieferten Lagesignale auf einem digitalen Speicheroszillograph dargestellt wurden. In Abbildung 6.4 ist eine solche Messung exemplarisch abgebildet.

Auslöser dieser Orbit-Schwingungen kann jede Störung eines Magnet-Netzgeräts sein. Hier könnte es sich um die Schwingung eines Quadrupol-Netzgerätes handeln, da diese bei entsprechender Ablage des Elektronenstrahls im Magneten zu einer gleichzeitigen Beeinflussung beider Ebenen führt, oder um die gleichzeitige Anregung beider Ebenen durch je ein oder mehrere Korrekturnetzgeräte in der horizontalen und vertikalen Ebene. Da dieses Verhalten immer nur für bestimmte Zeiten auftritt, ist eine Lokalisierung der Störquelle schwierig. Zur Zeit gibt es Hinweise, daß es sich um die Oszillation von Korrekturspulen-Netzgeräten handelt.

Da die Orbitmessung über das Kontrollsystem nur mit einer Meßfrequenz von 1Hz möglich ist, führt eine Orbitschwingung wie oben beschrieben zu Meßwerten, die mit der Amplitude der Störung schwanken. Da für die Kalibrationsmessungen nur die Position des Closed-Orbits, d.h. des Ladungsschwerpunkts gemittelt über einen Zeitraum von mehreren Schwingungsperioden von Bedeutung ist, führen diese Orbitschwingungen zu einem Meßfehler, der der Amplitude der Schwingung am jeweiligen BPM entspricht.

Um den Einfluß von Meßfehlern auf die Kalibration des Lagemeßsystems ab-

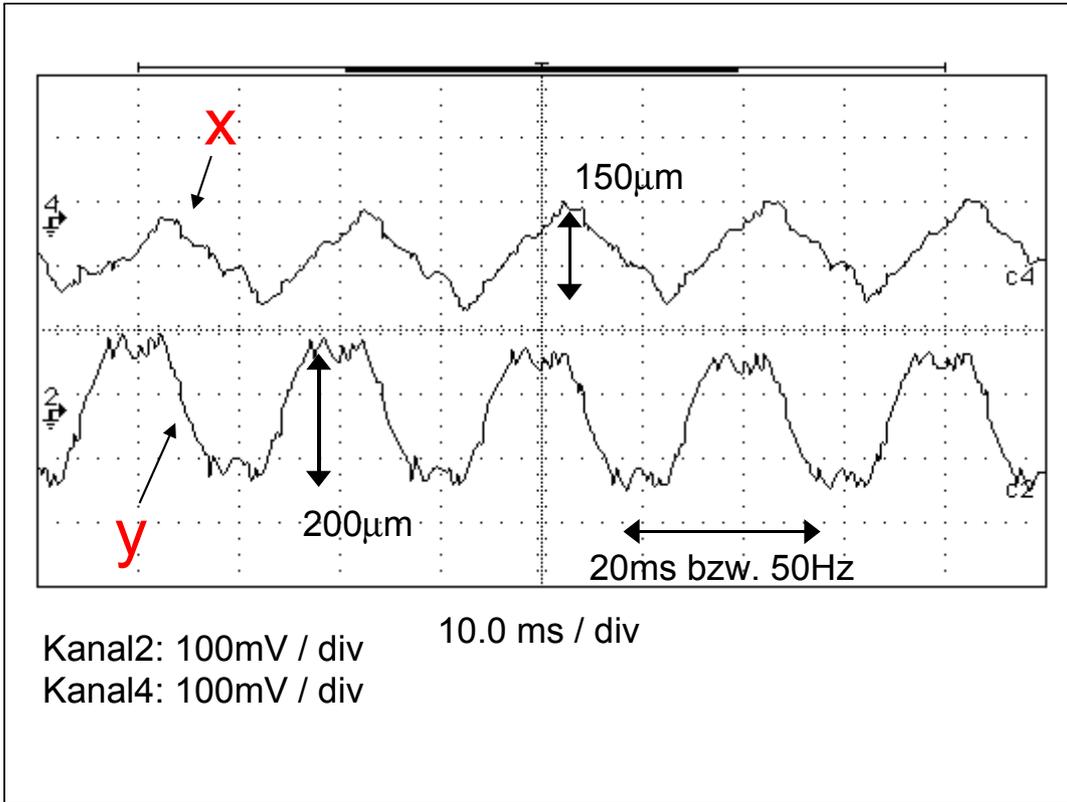


Abbildung 6.4: Orbitstörung gemessen an BPM2. Die Störung ist in beiden Ebenen zu beobachten, die Amplitude liegt in der Größenordnung von $200\mu m$, die Frequenz der periodischen Störung beträgt $50Hz$. Diese Störungen traten während des Beschleunigerbetriebs in unregelmäßigen Abständen auf und werden wahrscheinlich durch entsprechende Stromvariationen in Netzgeräten von Korrekturmagneten erzeugt.

zuschätzen, wurde wie folgt vorgegangen: Ausgehend von den für eine Kalibrationsmessung typischen Parametern sind Meßwerte für eine ideale Kalibrationsparabel mit 11 Stützstellen $(x_i, \overline{\Delta x_i^2})$ berechnet worden. Dann wurden diesen Punkten gaußverteilte Meßfehler aufgeprägt, wie sie zu erwarten sind, wenn alle zur Durchführung der Messung notwendigen Lagemessungen mit einem Fehler behaftet sind. Es sei σ_x der Meßfehler der einzelnen Lagemessung, dann gilt für den Meßfehler $\sigma_{\overline{\Delta x^2}}$ des Wertes $\overline{\Delta x^2} = 1/43 \cdot \sum_{i=1}^{43} \Delta x_i^2$:

$$\sigma_{\overline{\Delta x^2}} = 2^{3/2} \cdot \sigma_x \cdot \sqrt{\overline{\Delta x^2}} / \sqrt{43} \quad (6.3)$$

Für jeden vorgegebenen Meßfehler der Lagemessung σ_x wurden 100 Kalibrationsparabeln, ausgehend von der *idealen*, berechnet, bei denen jeder Meßpunkt $(x_i, \overline{\Delta x_i^2})$ sowohl in x als auch für $\overline{\Delta x^2}$ einen gaußverteilten Fehler mit einer Standardabweichung von σ_x aufgeprägt bekommen hat. Für alle diese Parabeln wurde der Offset b_x berechnet. Als Maß für den Fehler σ_{b_x} der Einzelmessung wird die

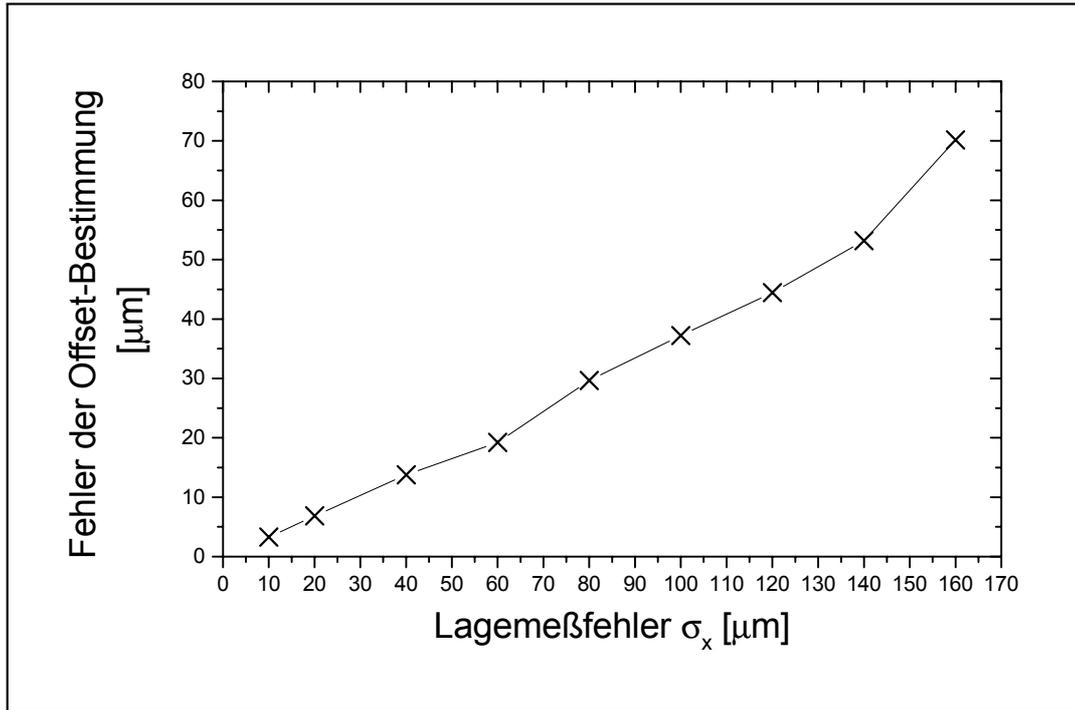


Abbildung 6.5: Fehler der Offset-Bestimmung nach der Quadrupolkick-Methode in Abhängigkeit von der Auflösung des Lagemeßsystems. Die Daten beruhen auf je 100 für jeden vorgegebenen Meßfehler berechneten Kalibrationsparabeln und den dazu bestimmten Offsets. Als Maß für den Fehler der Einzelmessung wird die Varianz der 100 berechneten Offsets verwendet.

Varianz des Mittelwertes aller 100 Meßwerte von b_x angegeben.

Für Werte von $\sigma_x \in \{10\mu\text{m}, 20\mu\text{m}, 40\mu\text{m}, 60\mu\text{m}, 80\mu\text{m}, 100\mu\text{m}, 120\mu\text{m}, 140\mu\text{m}, 160\mu\text{m}\}$ ist das Ergebnis dieser Simulationen in Abbildung 6.5 abgebildet. Als Faustregel läßt sich festhalten, daß der Fehler der Offset-Bestimmung σ_{b_x} die Hälfte des Meßfehlers der Einzelmessung beträgt: $\sigma_{b_x} = 1/2 \cdot \sigma_x$. D.h bis zu einem Meßfehler von $200\mu\text{m}$ in der Lagemessung, wie er z.B. durch die oben beschriebenen Strahlschwingungen dem Lagemeßsystem aufgeprägt werden kann, ist noch eine Genauigkeit in der Kalibration von $100\mu\text{m}$ zu erreichen. Bei einem ruhigen Strahl, der eine Auflösung von $5\mu\text{m}$ in der Lagemessung erlaubt, ist der theoretische Fehler der strahlgestützten Kalibration minimal und wird durch den Winkelfehler des Elektronenstrahls bestimmt.

Um dies zu verifizieren, wurde bei konstanten Bedingungen die Kalibrationsmessung an BPM17 in der vertikalen Ebene innerhalb einer Stunde 5 mal wiederholt. BPM17 ist in Quadrupol QD-6 installiert, für den die folgenden optischen Parameter gelten: $k = 2,35 \cdot 1/\text{m}^2$, $l_{\text{mag}} = 0,234\text{m}$, $\beta_y = 7,02\text{m}$. Für die relative Veränderung des k -Wertes wurde ein Wert von $\Delta k[\%] = 10\%$ gewählt, was mit einem Q -Wert von $Q_y = 2,849$ zu einem generalisierten Kickparameter von $\Delta\Theta_y = 0,3 \cdot 1/\text{m}^{1/2}$ führt. Die Meßdaten sind zusammen mit den Graphen

der an die Meßdaten angepaßten Parabeln in Abbildung 6.6 eingetragen.

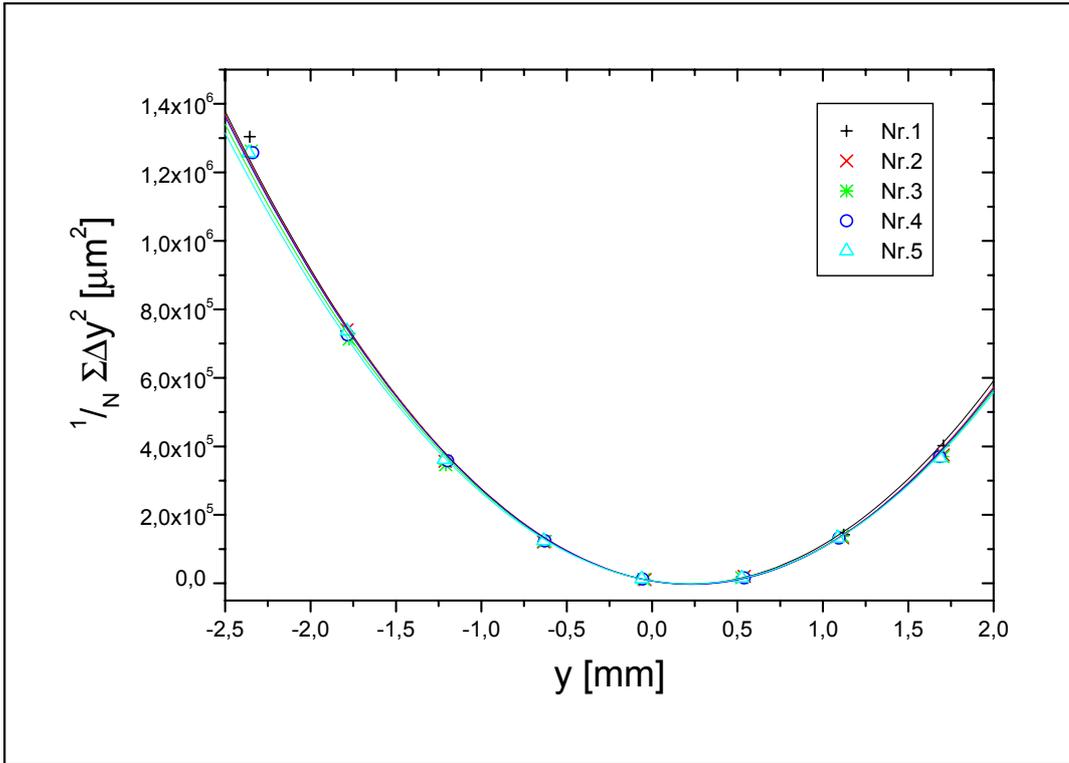


Abbildung 6.6: Abgebildet ist das Ergebnis von 5 Kalibrationsmessungen in der vertikalen Ebene, die innerhalb einer Meßzeit von $1h$ an BPM17 durchgeführt wurden. Der Mittelwert der berechneten Offsets und dessen Varianz beträgt $b_y = (-227 \pm 6) \mu m$. Dies belegt die Leistungsfähigkeit eines Systems zur strahlgestützten Kalibration.

In der nachfolgenden Tabelle sind die in den 5 Messungen bestimmten Fitparameter für die Parabelfunktion $p(y^q) = a_y \cdot (y^q + b_y)^2 + c_y$ zusammengefaßt:

	$a_y [\times 10^3]$	$b_y [\mu m]$	$c_y [\mu m^2]$
1	186,8	-218	-1790
2	184,0	-231	-2530
3	180,3	-229	-2150
4	183,1	-232	-3190
5	177,3	-224	-1508
$1/5 \sum$	$182,3 \pm 4.0$	-227 ± 6	-2230 ± 660

Man erkennt die sehr gute Reproduzierbarkeit der Messungen sowie die gute Übereinstimmung des Fehlers mit dem für eine Auflösung des Meßsystems von

$5\mu m$ vorhergesagtem. Die hohe Auflösung wurde erreicht, da während dieser Maschinenschicht keine kohärenten Strahlschwingungen zu beobachten waren.

Abschließend ist festzuhalten, daß die Genauigkeit der Kalibration des Strahllagemesssystems bestimmt ist durch die Qualität der vorhergehenden Orbitkorrektur. Je kleiner der Winkel ist, mit dem der Elektronenstrahl durch die Quadrupole geht, desto höher ist die Genauigkeit. Schon durch eine unkalibrierte Orbitmessung ist jedoch eine Genauigkeit von unter $200\mu m$ zu erreichen, und durch einen zweiten Iterationsschritt, der dann bei der Lagemessung und Orbitkorrektur die zuvor bestimmten Offsets berücksichtigt, ist diese auf Werte kleiner $20\mu m$ zu verbessern. Damit ist das in Kapitel 2.5 geforderte Ziel für die absolute Genauigkeit der Lagebestimmung in Relation zu den magnetischen Achsen der Quadrupolmagnete erreicht.

6.4 Ergebnisse der Kalibrationsmessungen

Nachdem die vorbereitenden Messungen zur Untersuchung des optimalen Parameter-Raums durchgeführt wurden, konnte die erste vollständige Kalibration des Lagemesssystems erfolgen. Es wurden alle 40 in Quadrupolmagnete eingebaute Strahllagemonitore in beiden Ebenen kalibriert. Die Betriebsparameter von DELTA waren dabei durch das zu dieser Zeit durchgeführte Experimentierprogramm vorgegeben.

Die Messungen wurden im März 1998 bei einer Strahlenergie von $0,96 GeV$ durchgeführt. Es wurde jeweils ein Strom von ca. $20 mA$ akkumuliert und gemessen bis dieser auf $10 mA$ abgenommen hat. Bei einer Strahllebensdauer von seinerzeit ca. $\tau = 1h$ konnten über einen Zeitraum von $0,5h$ kontinuierlich Messungen durchgeführt werden. Zur Durchführung aller Messungen mußte der Speicherring mehrmals neu gefüllt werden. Die relative k -Wert-Variation, realisiert durch eine entsprechende prozentuale Veränderung des Quadrupolstroms, wurde für jede BPM-Quadrupol-Kombination so gewählt, daß ein generalisierter Kickparameter von $\Delta\Theta_{x,y} = 0,2 \cdot 1/m^{1/2}$ erreicht wurde. Mittels der für jeden BPM individuell festgelegten 3er-Beule wurde der Strahl in einem Bereich von $\pm 2mm$, gemessen im Koordinatensystem des unkalibrierten Lagemesssystems, in $0,4mm$ Schritten durch den Quadrupol gelenkt. D.h. pro Ebene und BPM wurden 11 Meßpunkte aufgenommen.

Das Ergebnis dieser ersten Kalibrationsmessungen ist in Abbildung 6.7 dargestellt. In der Graphik wird dabei zwischen *fixierten* und *variablen* Strahllagemonitoren (Abschnitt 4.1) unterschieden. Zusätzlich wurden die Mittelwerte der Offsets \bar{x} und \bar{y} sowie deren Varianzen σ_x und σ_y in Tabelle 6.1, ebenfalls getrennt nach *fixierten* und *variablen* BPM, eingetragen.

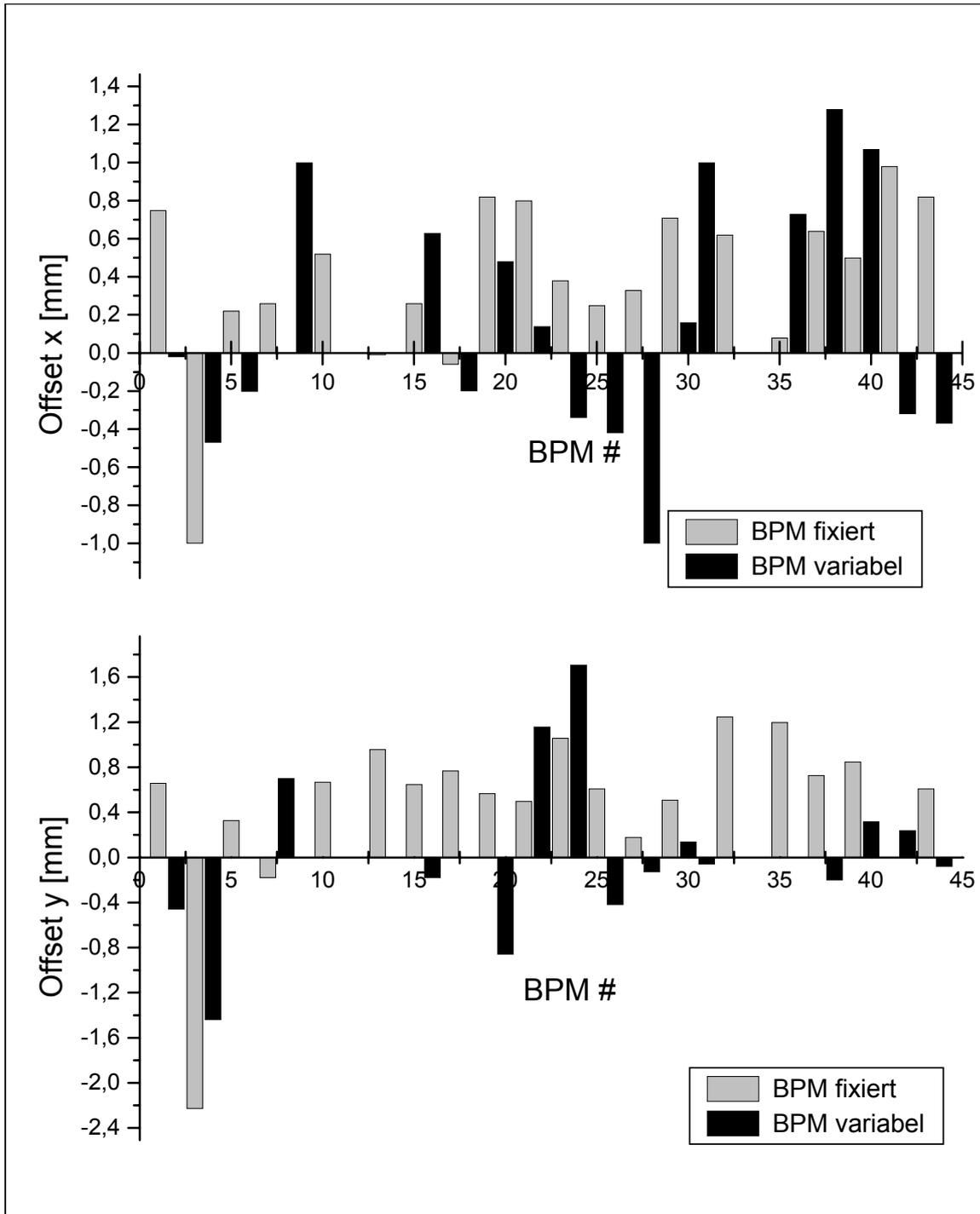


Abbildung 6.7: Ergebnis der Kalibrationsmessungen von März 1998 an allen 40 in Quadrupolmagneten eingebauten BPMs. Dargestellt ist der Offset des Lagemeßsystems in bezug auf die Achse des zum BPM gehörenden Quadrupolmagneten, jeweils getrennt für die x - und y -Koordinaten, wobei zwischen *fixierten* und *variablen* BPM unterschieden wird.

BPM Typ		Offsets 03/98 [mm]	03/98 \leftrightarrow 10/98 [mm]	Offsets 10/98 [mm]
<i>fixiert</i>	$\bar{x} \pm \sigma_x$	0,39 \pm 0,44	-0,10 \pm 0,18	0,29 \pm 0,50
	$\bar{y} \pm \sigma_y$	0,49 \pm 0,73	-0,11 \pm 0,22	0,37 \pm 0,68
<i>variabel</i>	$\bar{x} \pm \sigma_x$	0,16 \pm 0,62	-0,07 \pm 0,43	0,09 \pm 0,66
	$\bar{y} \pm \sigma_y$	0,02 \pm 0,66	-0,17 \pm 0,39	-0,14 \pm 0,72

Tabelle 6.1: Ergebnisse der ersten und zweiten Kalibrationsmessung an allen DELTA-Strahllagemonitoren. Es ist jeweils getrennt für *fixierte* und *variable* BPM und beide Ebenen der Mittelwert der jeweiligen absoluten BPM-Offsets und deren Varianz eingetragen. Zusätzlich sind diese Daten für die relative Verschiebung der Offsets zwischen den beiden Messungen dargestellt.

Erwartet wurde ein deutlicher Unterschied zwischen den *fixierten* BPMs, die nur ein Spiel von $< \pm 70 \mu\text{m}$ in den Quadrupolen haben und den *variablen* BPMs, die sich in jede Richtung um maximal $\pm 1,8 \text{mm}$ bewegen können. Die Ergebnisse zeigen aber, daß die Variation beider Typen in der gleichen Größenordnung liegen und ein Unterschied nicht signifikant feststellbar ist. Dies liegt darin begründet, daß die Ungenauigkeiten aufgrund der Übertragungsfunktionen der Pickup-Elektroden, der Meßkabel und der Elektroniken diese überdecken. Hier zeigt sich, wie wichtig eine strahlgestützte Kalibration ist, da diese alle Komponenten des Meßsystems bei der Messung direkt berücksichtigt.

Weiterhin fällt auf, daß für die *fixierten* BPMs in beiden Ebenen die Offsets signifikant zu positiven Werten verschoben sind. Ein positiver Offset bedeutet, daß das elektrische Zentrum des BPM in bezug auf die Achse des Quadrupols in horizontaler Ebene nach außen und in der vertikalen Ebene nach oben verschoben ist. Dies ist ein Hinweis auf eine systematische Abweichung von den Design-Maßen bei der Fertigung der Strahllagemonitore.

Wie schon in Kapitel 5 im Abschnitt über den Strahllagemonitor beschrieben, kam es bei der Einbringung der Aufnahmen für die Pickup-Elektroden zu Abweichungen vom Sollmaß. Durch Einsatz einer Einbaulehre, die während des Einschweißens der Elektroden in den BPM eingeschoben wurde, konnte verhindert werden, daß Elektroden in die Vakuumkammer hineinragen. Entstand der Fertigungsfehler dadurch, daß die BPM beim Bohren der Aufnahmen auf der CNC-Fräse systematisch in eine Richtung verschoben waren, könnten die Pickup-Elektroden auf der Oberseite des BPM alle um einen bestimmten mittleren Wert in der Passung zurückgezogen sein und somit die Meßsignale dieser Elektroden eine zusätzliche Dämpfung erfahren. Dies führt dazu, daß ein im BPM zentrierter Strahl mit einer negativen Ablage gemessen wird und würde den systematischen Offset der *fixierten* BPM in der vertikalen Ebene erklären.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit ist eine Abweichung der Außenkontur des BPM von der Sollvorgabe. Diese würde zu einer Verschiebung der elektrischen Mitte des BPM in bezug auf die zylindrische Außenkontur führen und könnte ebenfalls die systematische Offsetverschiebung erklären.

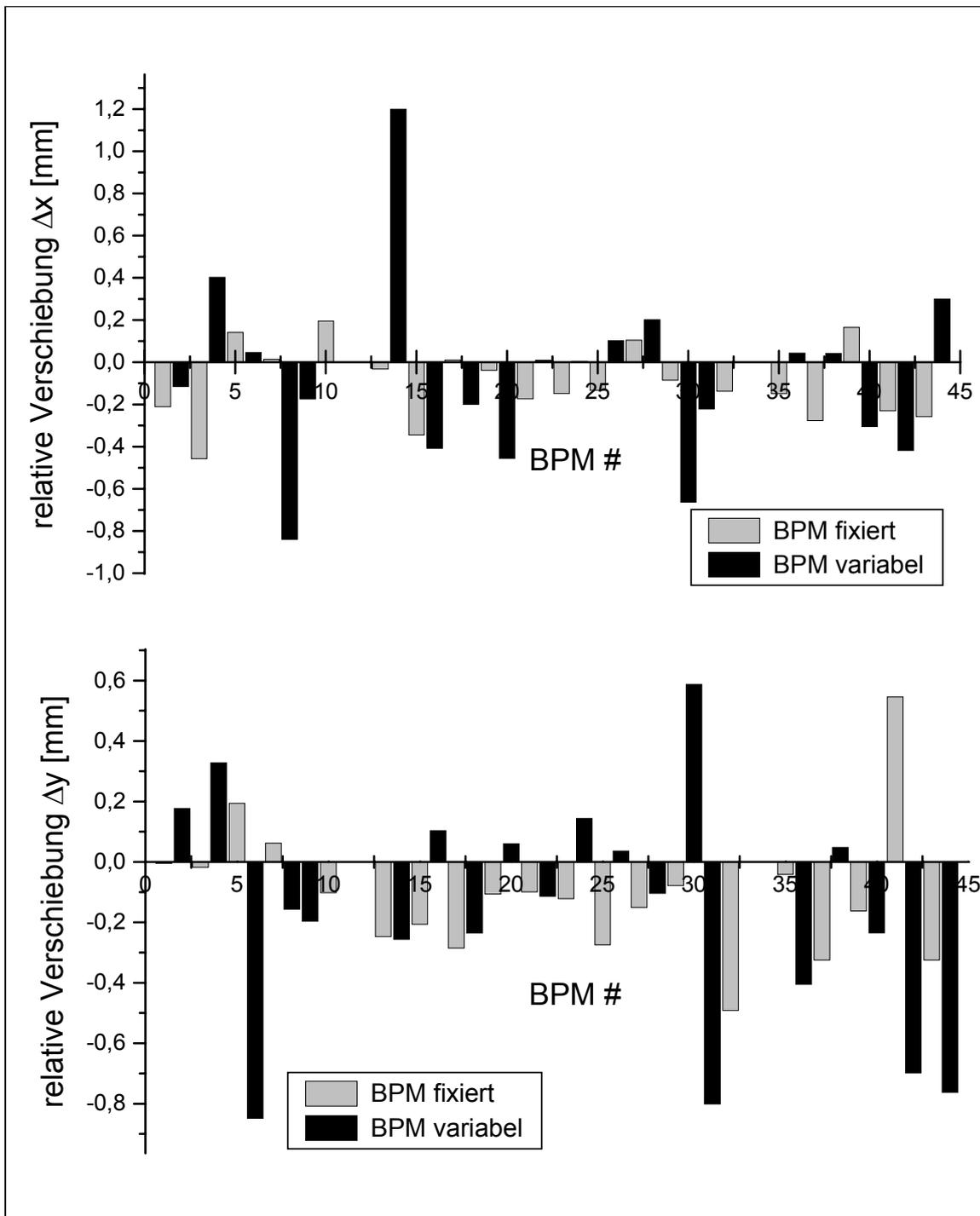


Abbildung 6.8: Aufgetragen ist die relative Verschiebung der BPM-Offsets zwischen der ersten (März 1998) und zweiten Kalibration (Oktober 1998) des Lagemeßsystems. In der Darstellung wird nach beiden Ebenen und den 2 verschiedenen BPM-Typen unterschieden.

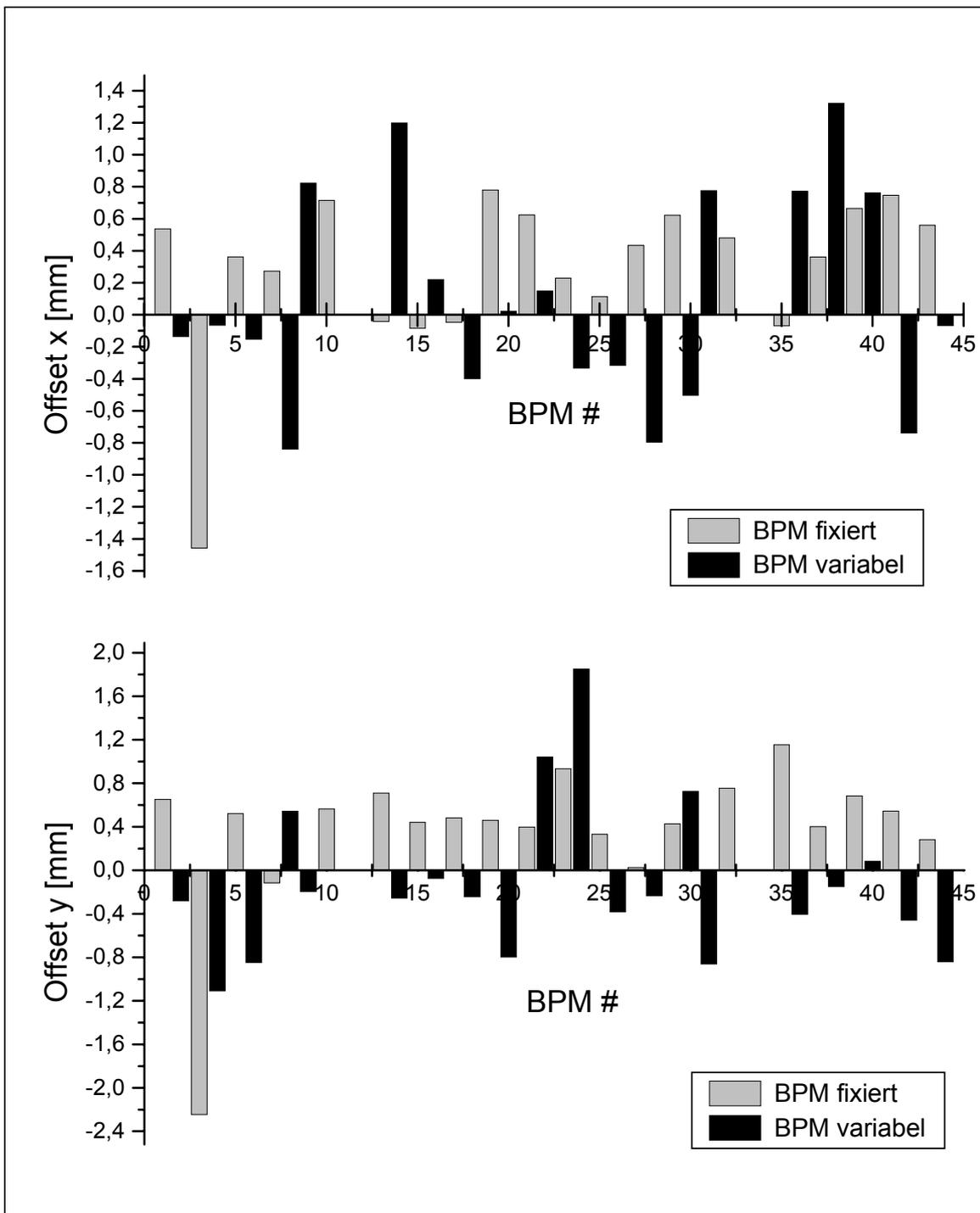


Abbildung 6.9: Ergebnisse der zweiten Kalibration des Lagemeßsystems vom Oktober 1998. In der Darstellung wird nach beiden Ebenen und den 2 verschiedenen BPM-Typen unterschieden.

Im Oktober 1998 wurde die nächste vollständige Kalibration des Lagemeßsystems bei einer Strahlenergie von $1,28\text{GeV}$ durchgeführt (Abbildung 6.9 und Tabelle 6.1). Es wurde jeweils ein Strahlstrom von 60mA akkumuliert und gemessen bis dieser auf 20mA abgefallen ist. Bei einer Lebensdauer von ca. $\tau = 4h$ waren kontinuierliche Meßzeiten von $3h$ möglich. In Abbildung 6.8 ist die relative Verschiebung der Offsets eingetragen. Da zwischen den beiden Messungen keine wesentlichen Umbauten am Lagemeßsystem durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, daß sich die Übertragungsfunktionen des Meßsystems (Pickup-Elektroden, Kabel, Meßelektronik) nicht verändert haben. Daher läßt sich in dieser Messung ein signifikanter Unterschied zwischen den *fixierten* und *variablen* BPMs, wie schon für die erste Messung erwartet, nachweisen (Tabelle 6.1). Kleine Bewegungen der Vakuumkammer und damit verbundener BPMs sind an einer Beschleunigeranlage wie DELTA aufgrund der notwendigen Arbeiten am Vakuumsystem im Rahmen der Konsolidierung und Installation neuer Experimente unvermeidlich und erklären die beobachteten Verschiebungen der Offsets der *variablen* BPM.

Aufgrund der Verlegung der Meßkabel zusammen mit anderen Kabeln der Infrastruktur in einem Kabelkanal ist eine Beeinflussung der Meßkabel durch Arbeiten an der Beschleunigeranlage nicht auszuschließen. Daher kann es an einzelnen Strahllagemonitoren, auch an denen vom Typ *fixiert*, insbesondere nach längeren Shutdown-Phasen zu größeren Abweichungen der BPM-Offsets kommen. Eine vollständige Kalibration des Lagemeßsystems muß daher nach größeren Umbauarbeiten an der Beschleunigeranlage routinemäßig durchgeführt werden. Werden Arbeiten an einzelnen Quadrupolen oder Teilen des Vakuumsystems notwendig, muß ebenfalls danach an allen betroffenen BPMs eine Neukalibration stattfinden.

Die Durchführung der vollständigen Kalibration, d.h. 40 Strahllagemonitore in 2 Ebenen, benötigt eine Meßzeit von $5h$ und ist somit, wie in Kapitel 5 gefordert, innerhalb einer Strahlschicht von $8h$ zu leisten. Die Kalibration eines BPM in beiden Ebenen erfordert eine Meßzeit von $450s$. Von diesen $450s$ sind $100s$ für die Datenaufnahme an jedem Meßpunkt (Orbitmessung, Setzen des Zusatzstromes und Messung des gestörten Orbits) notwendig, die restliche Zeit wird für das Fahren der 3er-Beule benötigt. Eine Verkürzung der Meßzeit ist durch eine Reduktion der Zahl der Meßpunkte möglich, die aber zu einer Erhöhung der Meßunsicherheit führt. Eine optimierte Ansteuerung der Korrekturspulenetzgeräte, die ein schnelleres Setzen von Stromveränderungen und damit eine größere Geschwindigkeit beim Verfahren des Strahls mittels 3er-Beulen ermöglicht, würde die Meßzeit ebenfalls reduzieren und wäre auch im Sinne einer schnelleren Orbitkorrektur wünschenswert.

6.5 Einfluß der Kalibration des Lagemeßsystems auf die Betriebsparameter

Nach der Kalibration des Strahllagemeßsystems wurde der Einfluß der BPM-Offsets auf die Betriebsparameter von DELTA untersucht. Dazu wurde jeweils

eine Orbitkorrektur durchgeführt, bei der die BPM-Offsets nicht berücksichtigt sind, sowie eine, bei der die Offsets berücksichtigt wurden, und somit die Korrektur in Relation auf die Achsen der Quadrupolmagnete ermöglicht wurde. Die Durchführung dieser Messungen wurde erleichtert durch die Flexibilität des DELTA-Kontrollsystems. Die BPM-Offsets werden dem Lagemeßsystem über eine Konfigurationsdatei zur Verfügung gestellt, die durch einen einfachen Befehl dem Lagemeßsystem neu eingeladen wird. Das Umschalten zwischen Closed-Orbit-Messung mit und ohne Offsets und das Laden unterschiedlicher Konfigurationsdateien ist somit innerhalb kürzester Zeit möglich.

6.5.1 Emittanz

Einer der wichtigsten Parameter einer Synchrotronstrahlungsquelle ist die Emittanz. Diese kann nach den in Abschnitt 2.5.2 durchgeführten Simulationen insbesondere in der vertikalen Ebene durch eine Orbitkorrektur in bezug auf die Quadrupolachsen, die durch eine sorgfältige Kalibration des Lagemeßsystems ermöglicht wird, beeinflußt werden. Daher wurde jeweils nach der Orbitkorrektur mit und ohne Verwendung der Kalibrationsdaten die Emittanz gemessen.

Dazu wurde an der Synchrotronstrahlungsbeamline des FEL-Experiments die von einem 3^o-Dipol stammende Synchrotronstrahlung mittels einer Teleskop-Optik auf eine CCD-Kamera abgebildet [44], um ein Abbild des Elektronenstrahls zu erhalten. Sind die Parameter der Beschleunigeroptik am Quellpunkt der Synchrotronstrahlung, die Vergrößerung der optischen Abbildung sowie die Größe der Pixel der CCD-Kamera bekannt, kann daraus die Emittanz für beide Ebenen berechnet werden. In der folgenden Tabelle sind die relevanten Parameter der Meßanordnung, wie sie für die DELTA006-Optik bei 1,28GeV und die verwendete optische Abbildung gelten, aufgeführt:

Betafunktion β_x	7,0m
Betafunktion β_y	11,7m
Dispersion D_x, D_y	< 0,002m , 0m
Energiebreite $\Delta p/p$	0,06%
CCD-Chip	3,6mm × 4,8mm 510Pixel × 720Pixel
Vergrößerung	× 0,4
horizontale Abbildung	17,6µm / Pixel
vertikale Abbildung	16,6µm / Pixel

Das Bild der schwarz-weiß CCD-Kamera wird über eine Frame-Grabber-Karte mit einer Auflösung von 256-Bit pro Pixel digitalisiert. Mittels Graufilter verschiedener optischer Dichte kann die Helligkeit des Bildes so eingestellt werden, daß eine Sättigung des CCD-Chips vermieden wird. In Abbildung 6.10 ist ein

Bild des Elektronenstrahls für die Emittanzmessung nach Orbitkorrektur ohne und mit BPM-Offsets zu sehen. Man erkennt deutlich, daß die vertikale Strahlgröße kleiner ist, wenn bei der Orbitkorrektur die BPM-Offsets berücksichtigt werden. Die horizontale Strahlgröße wächst, wie erwartet, leicht an. Ein weiterer Effekt ist, daß die Hauptachsen der Strahlellipse bei Verwendung der BPM-Offsets nahezu parallel zu den horizontalen und vertikalen Strahlebenen liegen, hingegen die Ellipse bei Korrektur ohne Verwendung der Offsets deutlich gedreht ist, was ein Zeichen für die größere Kopplung ist [9].

Durch Anpassen einer 2-dimensionalen Gaußverteilung an die Pixelwerte des Bildes können die horizontalen und vertikalen Strahldimensionen σ_x und σ_y bestimmt werden und gemäß folgender Gleichungen die Emittanzen berechnet werden (Gleichung 2.10):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x^2}{\beta_x} - \frac{\left(D_x \cdot \frac{\Delta p}{p}\right)^2}{\beta_x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y^2}{\beta_y} - \frac{\left(D_y \cdot \frac{\Delta p}{p}\right)^2}{\beta_y}\end{aligned}\tag{6.4}$$

In folgender Tabelle sind die gemessenen transversalen Strahldimensionen und die daraus berechneten Werte für die horizontale und die vertikale Emittanz eingetragen. Die eingetragenen Fehler berücksichtigen nur den Meßfehler der Strahlbreitenmessung.

	ohne BPM-Offset	mit BPM-Offset	Quotient
σ_x [μm]	440 ± 20	460 ± 30	$1,05 \pm 0,08$
ε_x [$nm rad$]	$27,7 \pm 2,5$	$30,2 \pm 4,0$	$1,09 \pm 0,17$
σ_y [μm]	320 ± 20	200 ± 50	$0,63 \pm 0,16$
ε_y [$nm rad$]	$8,8 \pm 1,1$	$3,4 \pm 1,7$	$0,39 \pm 0,20$

Durch die Kalibration des Lagemeßsystems konnte die vertikale Emittanz auf 40% des Wertes, der ohne Kalibration erreicht wird, reduziert werden. Die horizontale Emittanz steigt im Rahmen der Fehlergrenzen der Messung um einen entsprechenden Wert an. Bei der Berechnung der Emittanz wurden die theoretischen Werte der DELTA006-Optik benutzt. Messungen der horizontalen und vertikalen Dispersion zeigen, daß an der Position der Emittanzmessung die horizontale Dispersion größer ist als theoretisch berechnet und die vertikale Dispersion nicht gleich Null ist.

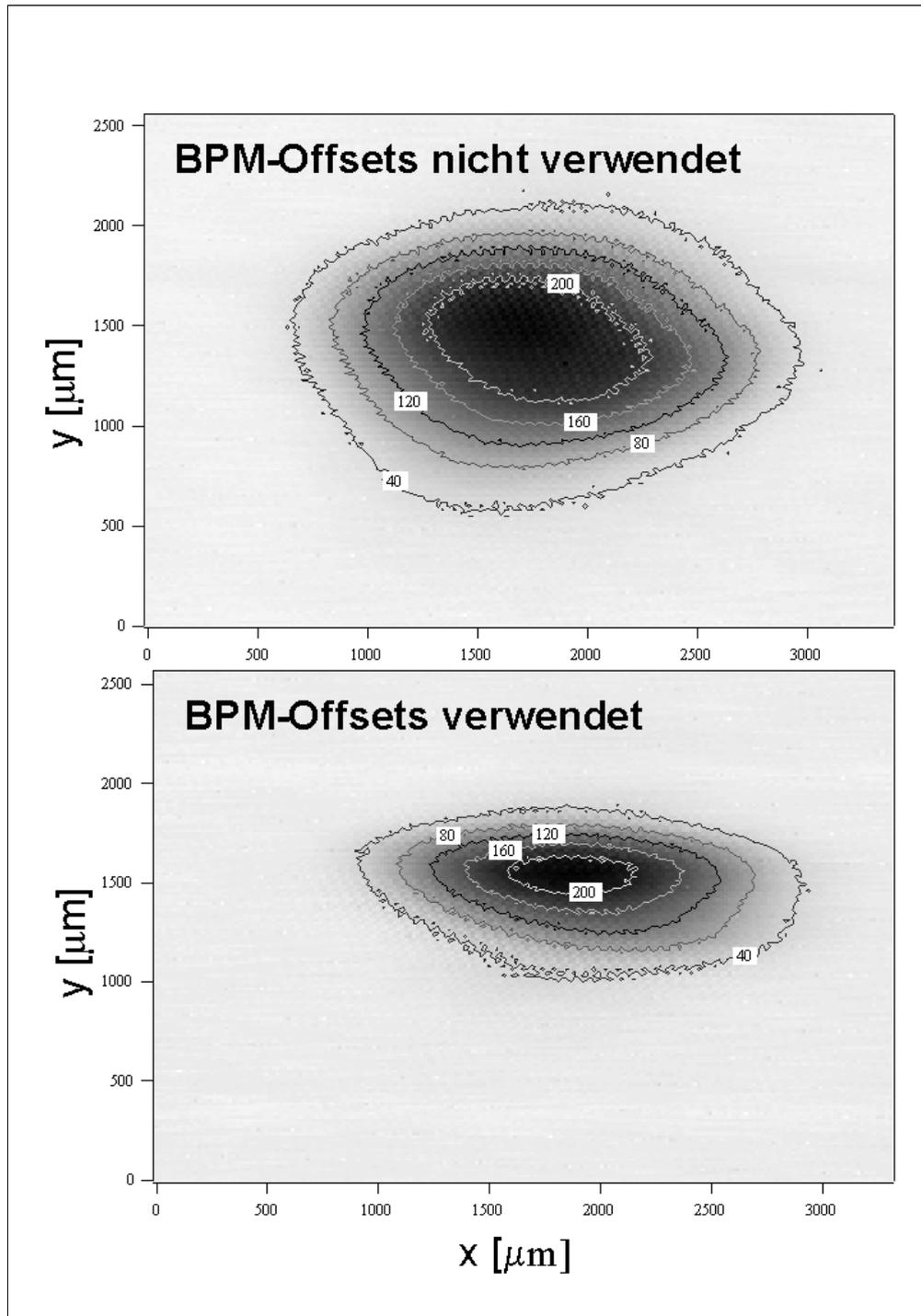


Abbildung 6.10: Messung der Emittanz nach Orbitkorrektur ohne und mit Verwendung der in Kalibrationsmessungen bestimmten BPM-Offsets. Die Messung wurde bei einer Energie von $1,28\text{GeV}$ und einem Strahlstrom von 20mA in der DELTA006-Optik durchgeführt. Man erkennt deutlich, daß die vertikale Strahlgröße und damit auch die vertikale Emittanz bei Verwendung der BPM-Offsets deutlich kleiner wird.

In der horizontalen Ebene beträgt die Dispersion nicht mehr als $D_x = 0,05m$ und in der vertikalen nicht mehr als $D_y = 0,01m$. Die daraus resultierende Korrektur der Emittanz gemäß Gleichung 6.4 beträgt in der horizontalen Ebene, eine Energiebreite von $\Delta p/p = 0,06\%$ des gespeicherten Strahls vorausgesetzt, $0,13nm\ rad$ und in der vertikalen Ebene $3,1pm\ rad$ und kann somit vernachlässigt werden.

Messungen der lokalen Betafunktionen haben Abweichung bis zu einigen 10% von den theoretisch berechneten Betafunktionen der DELTA006-Optik gezeigt. Die größten Abweichungen wurden im Bereich der langen Geraden, wo diese Messung durchgeführt wurde, aufgrund der komplizierten Anpassung der Optik der Bögen an die Anforderungen in der Geradenmitte beobachtet. Insofern ist ein zusätzlicher Meßfehler von einigen 10% in der Emittanzmessung möglich, der beim relativen Vergleich der gemessenen Emittanzen in einer Ebene keine Rolle spielt. Dieser kann aber die Abweichung der horizontalen Emittanz, für die Werte von ca. $30nm\ rad$ gemessen wurden, von der theoretisch für eine Energie von $1,28GeV$ berechneten, die $16nm\ rad$ beträgt, erklären.

Die selbst nach der Orbitkorrektur unter Verwendung der gemessenen BPM-Offsets immer noch sehr große Kopplung $k = \varepsilon_y/\varepsilon_x$ von mehr als 10%, deutet auf größere Fehlauflösungen der DELTA-Magnete hin. Betrachtet man Abbildung 2.4 aus Abschnitt 2.5.2, so kann gemäß der Simulationsrechnungen ein maximaler transversaler Aufstellfehler der Quadrupolmagnete von ca. $0,8mm$ erwartet werden. Eine im August 1999 durchgeführte geodätische Vermessung aller Magnete hat dies bestätigt.

Die Magnete wurden daraufhin neu eingerichtet. Es kann nun von einer Genauigkeit der Aufstellung der Quadrupolmagnete von $< 0,2mm$ ausgegangen werden. Nach einer erneuten Kalibration des Lagemeßsystems ist dann zu erwarten, daß die Kopplung auf Werte von kleiner 1% reduziert werden kann und eine vertikale Emittanz in der Größenordnung von $0,2nm\ rad$ erreicht wird. Eine weitere Reduktion der Kopplung, um noch kleinere vertikale Emittanzen zu erzielen, ist dann nur noch durch die Installation von sogenannten Skew-Quadrupolen³ an geeigneten Stellen der Beschleunigeroptik zu erreichen.

6.5.2 Closed-Orbit und Kickstärken der Korrekturmagnete

Hier soll nun der Einfluß der Kenntnis der BPM-Offsets bei der Orbitkorrektur auf den resultierenden Orbit und die dazu notwendigen Kickwinkel der Korrekturmagnete untersucht werden. In Abbildung 6.11 ist der korrigierte Orbit in der vertikalen Ebene aufgetragen, wie er sich nach der Orbitkorrektur mit und ohne Verwendung der BPM-Offsets einstellt.

³Skew-Quadrupole sind um 45° Grad um die s -Achse gedrehte Quadrupolmagnete. An geeigneter Position im Beschleuniger installiert, erlauben diese die Kopplungselemente der Transfermatrix des Beschleunigers auf nahezu Null einzustellen und damit die Kopplung von horizontaler und vertikaler Ebene zu minimieren.

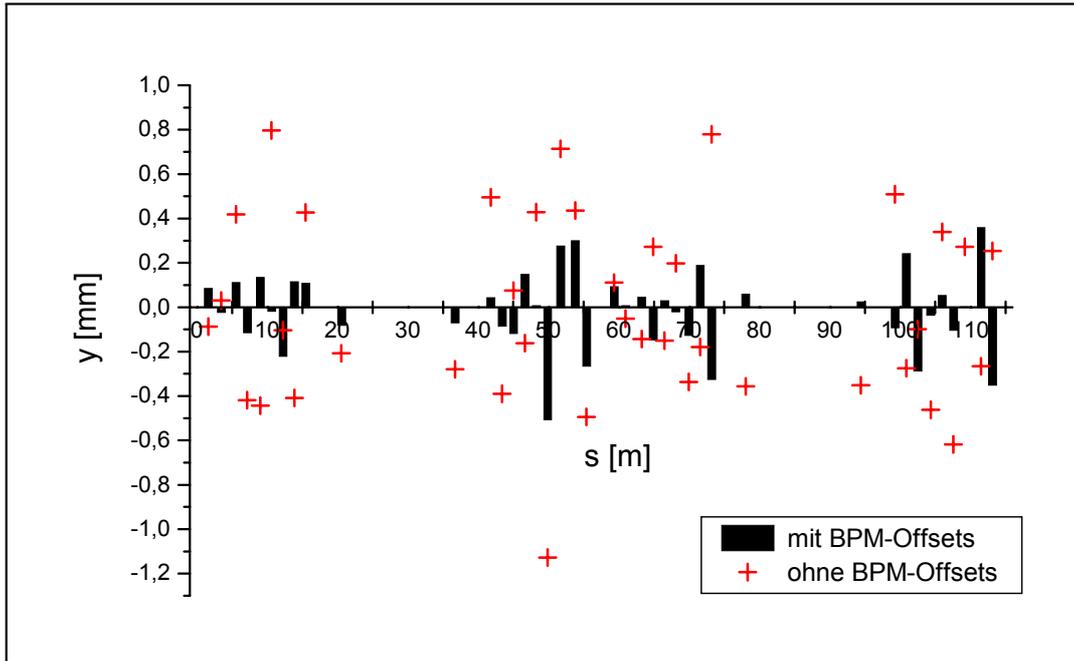


Abbildung 6.11: Closed-Orbit der vertikalen Ebene, dargestellt in Relation zu den Achsen der Quadrupolmagnete, nach Orbitkorrektur mit und ohne Verwendung der BPM-Offsets. Man sieht die deutliche Verbesserung der Qualität des Closed-Orbit bei Verwendung der BPM-Offsets.

Man erkennt, daß durch die Verwendung der BPM-Offsets die vertikalen Ablagen deutlich reduziert werden können. Die RMS-Ablage beträgt ohne Verwendung der Offsets $y_{rms}^{ohne} = 0,42mm$ und reduziert sich durch die Verwendung der Offsets bei der Orbit-Korrektur auf einen Wert von $y_{rms}^{mit} = 0,18mm$.

Noch deutlicher ist das Ergebnis, wenn man die Stärken der vertikalen Korrekturmagnete vergleicht, die in beiden Fällen zur Durchführung der Orbit-Korrektur notwendig sind. Diese sind in Abbildung 6.12 abgebildet. Der RMS-Wert der Korrektorstärken konnte von $\theta_{y,rms}^{ohne} = 0,29mrad$ auf einen Wert von $\theta_{y,rms}^{mit} = 0,13mrad$ verkleinert und insbesondere die Stromstärke der maximal erregten Korrekturmagnete von $7A$ auf $3A$ deutlich reduziert werden.

Dies ist besonders wichtig, da die Korrekturspulen-Netzgeräte maximale Stromwerte von $\pm 10A$ zulassen. Eine schon bei $1,28GeV$ mit $7A$ betriebene Korrekturspule schränkt die Möglichkeiten der Anpassung des vertikalen Orbits an besondere Experimentierbedingungen erheblich ein. Die Reduktion des mittleren Stromes der Korrekturspulen von $\bar{I} = 2,1A$ auf $0,9A$ durch Verwendung der BPM-Offsets erweitert daher den Handlungsspielraum wesentlich.

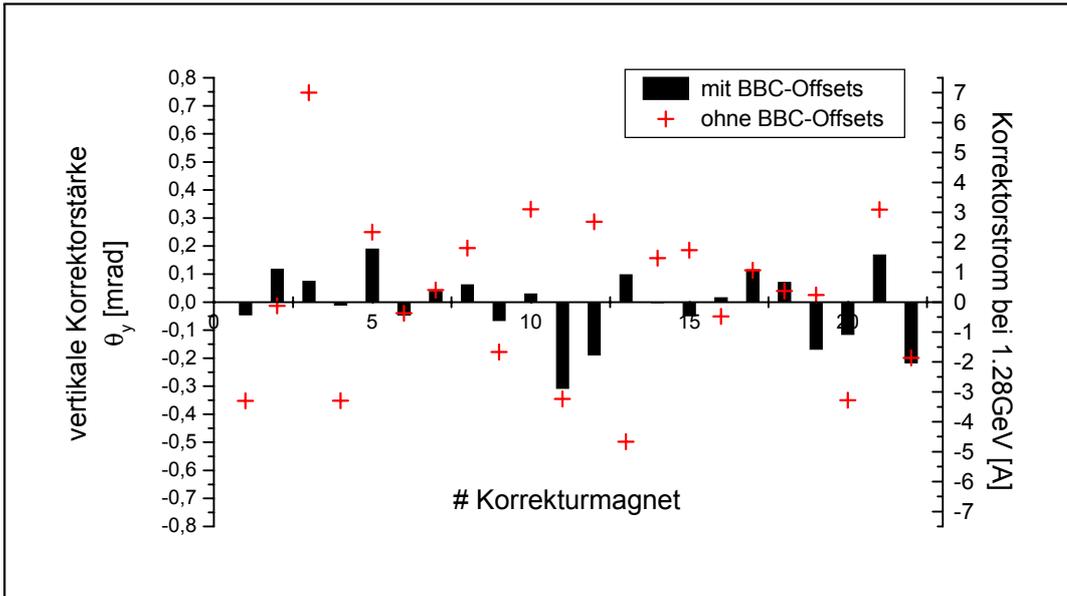


Abbildung 6.12: Kickstärken der vertikalen Korrekturmagnete nach erfolgter Orbit-Korrektur mit und ohne Verwendung der BPM-Offsets. Zusätzlich sind die bei einer Energie von $1,28\text{GeV}$ notwendigen Stromstärken der Korrekturmagnete abzulesen. Man erkennt ebenfalls die deutliche Reduktion der notwendigen Kickwinkel und insbesondere die Reduktion des maximal notwendigen Korrektorstromes von 7A auf 3A bei Verwendung der BPM-Offsets.

6.6 Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Kalibrations-Systems und Ergebnisse

Die für die Durchführung der strahlgestützten Kalibration notwendigen Einrichtungen, die eine individuelle Variation des k -Wertes einzelner Quadrupole erlauben, eröffnen die Möglichkeit weiterer Messungen. Zwei sollen nun im Detail vorgestellt werden.

6.6.1 Messung der lokalen Betafunktionen

Wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, führt die Veränderung des k -Wertes eines Quadrupolmagneten um Δk zu einer Verschiebung der Q -Werte gemäß Gleichung 5.15, die proportional zur mittleren Betafunktion $\bar{\beta}_{x,y}$ ist. Dies gibt die Möglichkeit, durch eine definierte Variation des k -Wertes und gleichzeitige Messung der resultierenden Q -Wert-Verschiebung, die Betafunktion zu bestimmen [23]. In der folgenden Bestimmungsgleichung für die Betafunktion wurde Gleichung 5.15 um den Term der nächsthöheren Ordnung erweitert:

$$\bar{\beta}_{x,y} = \frac{4\pi}{l_{mag}} \cdot (1 + \pi \Delta Q_{x,y} \cot[2\pi Q_{x,y}]) \cdot \frac{\Delta Q_{x,y}}{\Delta k} \quad (6.5)$$

Bis zur Installation des Systems zur strahlgestützten Kalibration war eine Vermessung der Betafunktionen in jedem einzelnen Quadrupol nicht möglich, da wie in Abschnitt 5.3.1 beschrieben, bis zu 4 Quadrupole einer Familie von einem Netzgerät gespeist werden. Durch Veränderung des Stroms eines Netzgerätes wird somit der k -Wert mehrerer Quadrupole variiert und die gemessene Q -Wert-Verschiebung ist bestimmt durch die über alle Quadrupole gemittelte Betafunktion.

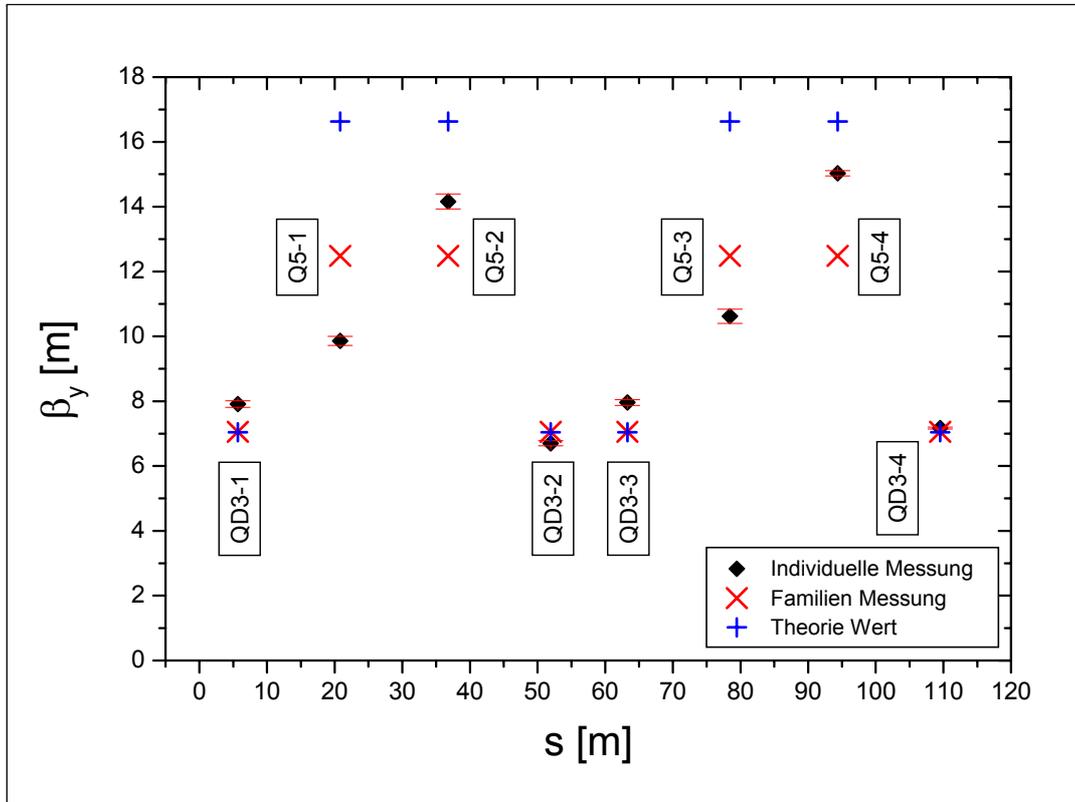


Abbildung 6.13: Vergleich der über eine Quadrupolfamilie gemittelt gemessenen vertikalen Betafunktionen mit den individuell für jeden Quadrupol bestimmten. Zusätzlich ist der jeweilige Theoriewert der DELTA006-Optik eingetragen. Die Meßergebnisse sind beispielhaft für die Quadrupolfamilien QD3 und Q5 dargestellt.

In Abbildung 6.13 sind die Ergebnisse einer Messung der über alle Quadrupole einer Familie gemittelten vertikalen Betafunktion und der individuellen Messung in jedem einzelnen Quadrupol dargestellt. Die Familienmessung läßt nur beschränkten Rückschluß auf die tatsächlichen Gegebenheiten zu. Man erkennt, daß

diese Messung für die Familie QD3 eine sehr gute Übereinstimmung von Meßwert und Theoriewert zeigt, während erst die durch die Installation des Kalibrations-systems ermöglichte Messung der individuellen Betafunktionen Abweichungen in allen 4 Quadrupolen offenbaren.

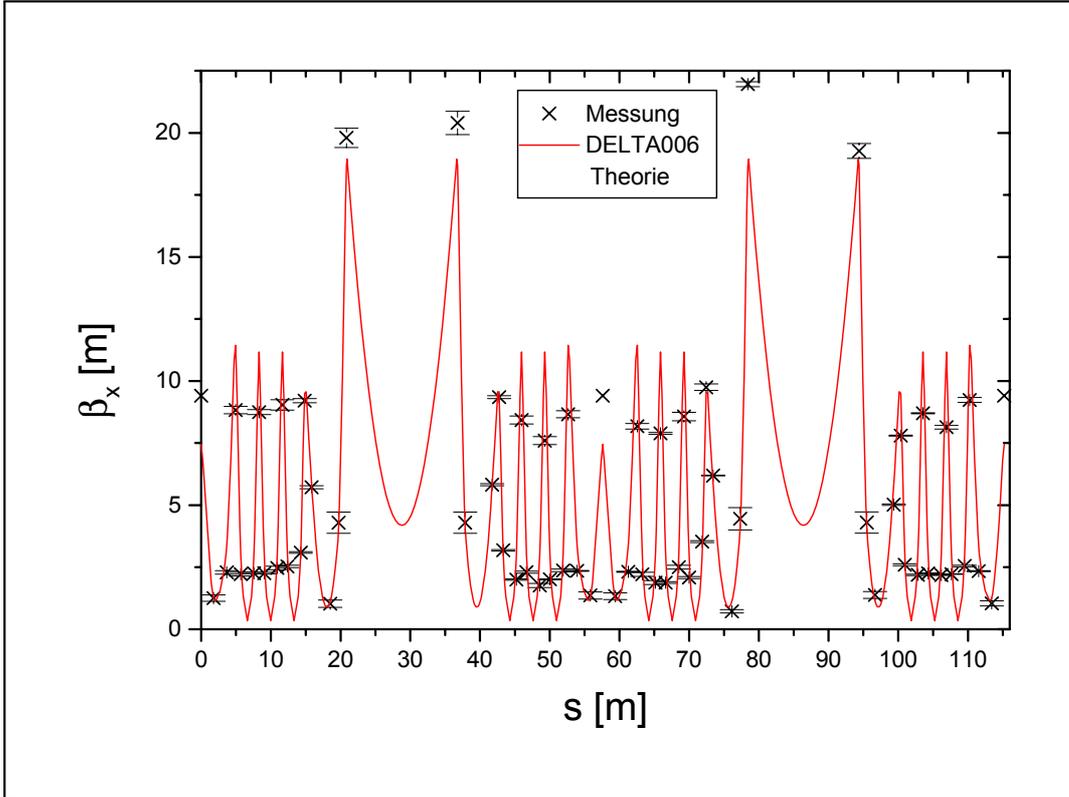


Abbildung 6.14: Messung der horizontalen Betafunktion der DELTA006-Optik. Durch Verwendung der Hardware des Systems zur strahlgestützten Kalibration ist eine Messung der mittleren Betafunktion jedes einzelnen Quadrupolmagneten möglich. Dargestellt sind die Meßwerte zusammen mit der mittleren MAD theoretisch berechneten Betafunktion. Die Messung wurde bei einer Energie von $1,28\text{GeV}$ durchgeführt, d.h. in einzelnen Quadrupolen treten bereits erste Sättigungseffekte auf.

In Abbildung 6.14 ist das Ergebnis einer Messung der mittleren Betafunktion aller Quadrupolmagnete zusammen mit den Werten der mit MAD für die DELTA006-Optik theoretisch berechneten Betafunktion abgebildet. Man erkennt, wie gut die Struktur der theoretisch vorgegebenen Optik wiedergegeben wird. Aber auch systematische Abweichungen, z.B. in den Bögenmitten an den Positionen 0m und 58m , an denen die gemessene Betafunktion deutlich größer ist als die der theoretischen Optik, sind deutlich zu erkennen.

Erst durch die Messung der individuellen Betafunktionen war eine genauere Analyse der Sättigungseffekte von Quadrupolfamilien bei höheren Energien und

eine systematische Korrektur der Abweichungen der gemessenen von der theoretischen Optik möglich.

6.6.2 Strahlgestütztes Alignment von Quadrupolmagneten

Die Quadrupole QA-1,QA-2,QB-1 und QB-2, die in der Mitte der unteren langen Geraden des Speicherrings zur Anpassung der Beschleunigeroptik an die Erfordernisse des Supraleitenden-Wiggler-Magneten installiert sind (Abbil-

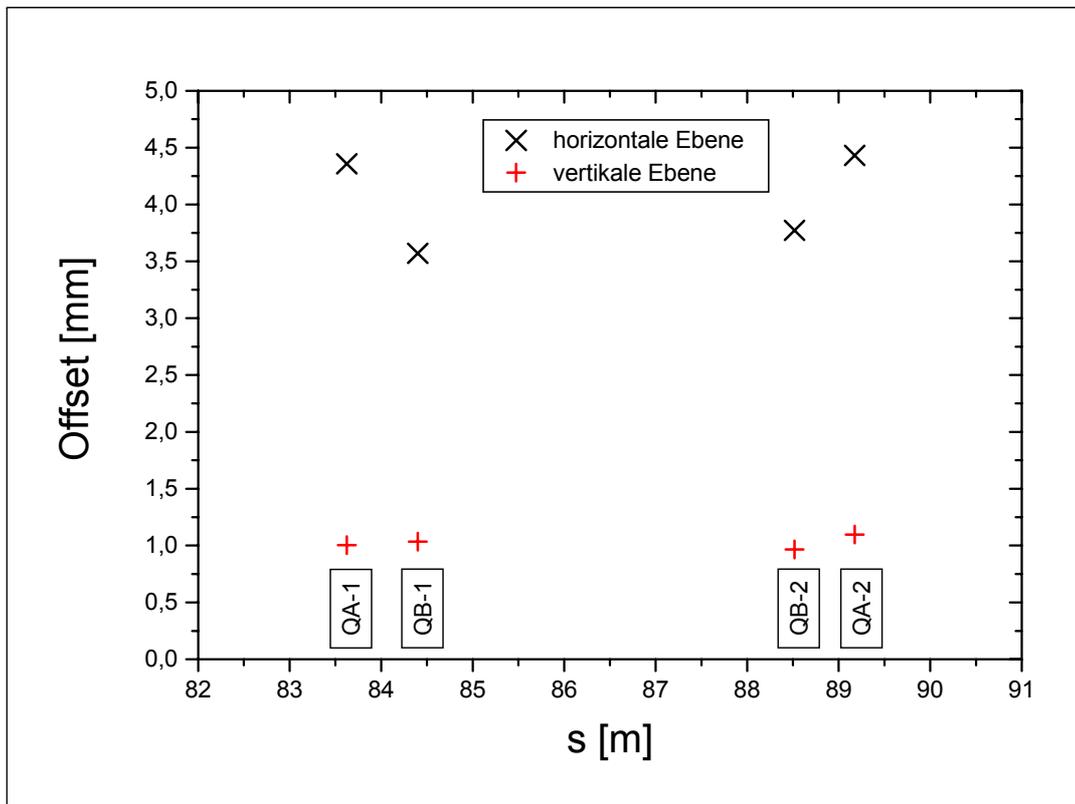


Abbildung 6.15: Alignment-Messungen an den Quadrupolen QA-n und QB-n (n=1,2). Positive Werte bedeuten, daß die Achse des untersuchten Quadrupolmagneten in Relation zum Orbit des gespeicherten Strahls außen und oben liegt, d.h. alle vier Quadrupole sind gemäß dieser Messung ca. 1mm zu hoch aufgestellt und $3,5\text{mm}$ bis $4,5\text{mm}$ zu weit außen plaziert.

dung 4.2) konnten mit Hilfe des Systems zur strahlgestützten Kalibration bezüglich ihrer Position zum Closed-Orbit der DELTA006-Optik vermessen werden. Diese Quadrupole werden in dieser Optik nicht erregt und werden erst bei Betrieb des Wiggler-Magneten benötigt. Daher konnten die folgenden Messungen durchgeführt werden.

Der Elektronen-Strahl wurde in der DELTA006-Optik gespeichert und der Orbit korrigiert. Dann wurde jedem der 4 Quadrupol-Magneten QA-n und QB-n individuell ein Strom gesetzt, der zu einem definierten k -Wert des Quadrupols führt. Nach Setzen des Stroms erfährt ein nicht auf der Achse des Quadrupols passierender Elektronenstrahl einen Winkelkick (Abschnitt 5.2), der zu einer Closed-Orbit-Störung führt. Vergleicht man diese Orbit-Störung mit der für einen um $(\Delta x, \Delta y)$ verschobenen Quadrupol der Stärke k , die mit MAD berechnet wurde, so läßt sich auf die Abweichung der Quadrupolachse vom Orbit der DELTA006-Optik schließen.

Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 6.15 eingetragen. Man erkennt, daß alle 4 Quadrupole, die nachträglich der Optik hinzugefügt wurden, in bezug auf den Closed-Orbit um ca. $1mm$ zu hoch aufgestellt sind und in der horizontalen Ebene um bis zu $4,5mm$ nach außen verschoben sind. Betrachtet man die Ergebnisse der horizontalen Ebene so erscheint es, als ob jeweils die Quadrupole QA-1 und QB-1 sowie QB-2 und QA-2 entlang einer Geraden aufgestellt sind, die einen Winkel von ca. $+1mrad$ bzw. $-1mrad$ zum Closed-Orbit aufweisen. Die Fehlaufstellung in der horizontalen Ebene wurde in gleicher Größenordnung durch die geodätische Vermessung aller Quadrupole bestätigt.

Die Möglichkeit, jedem Quadrupol individuell einen Zusatzstrom aufzuprägen, erlaubt, wie oben beschrieben, an jedem Quadrupol eine Lagemessung des Elektronenstrahls. Damit können detailliertere Informationen über den Closed-Orbit in bezug zu allen Quadrupolachsen gewonnen werden, die neue Erkenntnisse über das Alignment der Quadrupolmagnete eröffnen und eine genauere Analyse vorhandener Orbitstörungen ermöglichen.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Das Lagemeßsystem ist das Rückgrat der Strahldiagnose einer Speicherringanlage. Es wurde gezeigt, daß eine moderne Synchrotronstrahlungsquelle der 3. Generation eine Stabilisierung der Strahllage mit einer Auflösung von μm erfordert. Auch hängt die Qualität einer Vielzahl von Messungen von Maschinenparametern von der relativen Auflösung des Lagemeßsystems, d.h. der Fähigkeit kleinste Verschiebungen des Elektronenstrahls zu detektieren, ab. An DELTA wurde daher ein Meßsystem aufgebaut, daß eine relative Auflösung von $5\mu m$ ermöglicht und im Arbeitsbereich der Beschleunigeranlage bei Strömen von $1mA$ bis zu einigen $100mA$ präzise Lagemessungen erlaubt. Für die Zukunft ist eine Umrüstung der Kontrollsystemanbindung geplant, die zu einer Verbesserung der Auflösung auf kleiner $1\mu m$ führen soll.

Die absolute Meßgenauigkeit der Lagemessung in bezug auf die Achsen der Quadrupolmagnete bestimmt wesentliche Betriebsparameter der Beschleunigeranlage. Simulationsrechnungen zeigen, daß eine Genauigkeit von $< 100\mu m$ bei der Lagemessung relativ zu den Quadrupolachsen erreicht werden muß, wenn ein Kopplungsfaktor, der das Verhältnis von vertikaler zu horizontaler Emittanz angibt, von 0.1% erzielt werden soll. Um diese Genauigkeit erreichen zu können, ist eine Kalibration des Lagemeßsystems zwingend notwendig. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß eine konventionelle Vorgehensweise, bei der jede Komponente des Meßsystems einzeln für sich kalibriert wird, die erforderliche Genauigkeit nicht erreichen kann. Für DELTA wurde daher im Rahmen dieser Arbeit ein System zur strahlgestützten Kalibration erfolgreich entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen.

Dieses erlaubt die in situ Kalibration des vollständig installierten Systems und beruht auf der Eigenschaft von Quadrupolmagneten, daß deren magnetisches Feld linear mit dem Abstand von der Achse ansteigt. Detaillierte Studien haben ergeben, daß die Genauigkeit der Kalibrationsmessungen durch die Qualität der vorhergehenden Orbitkorrektur bestimmt ist. Ein iteratives Vorgehen, bei dem jeweils die zuvor bestimmten BPM-Offsets von den Quadrupolachsen die Basis für eine erneut durchgeführte Orbitkorrektur und nachfolgende Kalibration sind, ermöglicht eine Genauigkeit der Strahllagemessung in bezug auf die Achsen der Quadrupolmagnete bis herab zu $20\mu m$.

Die Durchführung der Kalibration des kompletten Meßsystems bestehend aus 43 Strahllagemonitoren ist innerhalb von $5h$ Strahlbetrieb möglich. Diese verglichen mit einem Zeitaufwand von einigen Wochen bei einer konventionellen Kalibration kurze Meßzeit erlaubt eine regelmäßige Wiederholung der Messungen am Gesamtsystem oder einzelner BPM.

Mehrere innerhalb eines Jahres durchgeführte Kalibrationsmessungen haben gezeigt, daß die BPM-Offsets bis zu $2mm$ betragen können. Dabei zeigte sich, daß es bedingt durch Arbeiten am Vakuumsystems des Beschleunigers zu Verschiebungen der Offsets einzelner BPM von bis zu $1mm$ kam. Dies belegt, wie wichtig die Entwicklung und der Einsatz einer Kalibrationsmethode ist, die eine schnelle Wiederholbarkeit der Messungen ermöglicht. Die strahlgestützte Kalibration des Lagemeßsystems ist heute integraler Bestandteil des Maschinenbetriebes bei DELTA und wird routinemäßig nach jeden Umbau- und Wartungsarbeiten am Magnet- oder Vakuumsystem mit sehr guten Ergebnissen durchgeführt.

Die Berücksichtigung der durch die strahlgestützte Kalibration bestimmten BPM-Offsets bei der Orbitkorrektur ist eine essentielle Voraussetzung für die Reduktion der vertikalen Emittanz. Mit MAD durchgeführte Simulationen zeigen, daß für den Fall der *idealen* Optik, d.h. ohne Fehlaufstellungen der Magnete, eine Reduktion um 2 Größenordnungen zu erwarten ist. An DELTA konnte die Emittanz zunächst nur um den Faktor 3 reduziert werden. Simulationsrechnungen zeigen aber, daß dies durch um bis zu $1mm$ von ihrer Sollposition abweichende Quadrupol- und Sextupolmagnete erklärt werden kann. Eine geodätische Vermessung der Magnetpositionen bestätigte diese Vermutung, die Magnete wurden daraufhin neu justiert. In Zukunft kann so eine Kopplung von kleiner 1% und damit verbunden eine vertikale Emittanz von $0,2nmrad$, bei einer Strahlenergie von $1,5GeV$ und einer horizontalen Gleichgewichtsemittanz von $20nmrad$, erreicht werden. Für die Praxis sehr wichtig ist, daß durch die Kenntnis der BPM-Offsets eine Reduktion der zur Orbitkorrektur notwendigen Stärke der vertikalen Korrekturmagnete um einen Faktor 3 erreicht werden konnte. Dies führt zu einer deutlichen Vergrößerung der Variationsbreite für die gezielte Verschiebung des Elektronenstrahls zur Anpassung an die Anforderungen unterschiedlicher Beamlines.

Durch den Einsatz neuer Netzgeräte, die eine schnellere Veränderung der Erregung der Korrekturmagnete erlauben, ist eine Verkürzung der Meßzeit zur Durchführung der Kalibration eines BPM auf kleiner 1 min möglich. Diese Meßgeschwindigkeit erlaubt die dynamische Untersuchung von Bewegungen der BPMs relativ zu den Quadrupolmagneten, die durch die Veränderung der thermischen Belastung des Vakuumsystems durch Synchrotronstrahlung bedingt sind. Die Ergebnisse dieser Messungen können etwa für ein Feed-Forward der BPM-Bewegung bei der Strahllagemessung genutzt werden, um eine hohe Positionsstabilität des Elektronenstrahls zu gewährleisten.

Um den Einfluß der transversalen Strahldimensionen auf die relative Strahllagemessung zu untersuchen, wurde auf analytischem Weg ein Zusammenhang zwischen der Antwortfunktion eines BPM mit kapazitiven Pickup-Elektroden und den Standardabweichungen der 2-dimensionalen gaußförmigen Ladungsverteilung hergeleitet. Es hat sich gezeigt, daß die Abweichungen der Antwortfunktionen

von den Signalfunktionen nur durch die Differenz der Quadrate der Standardabweichungen in x - und y -Richtung $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ bestimmt sind. Numerische Berechnungen zeigen, daß der Einfluß der Strahldimensionen auf die Lagemessung an Synchrotronstrahlungsquellen der 3. Generation, deren transversale Strahldimensionen im Bereich von $100\mu m$ liegen, wenige μm beträgt. Die Vernachlässigung der Transversal-Dimensionen ist daher in der Regel gerechtfertigt. Eine Relevanz bei der Optimierung des Betriebs ist daher nur bei einer sehr hohen relativen Auflösung des Lagemeßsystems in Verbindung mit einem Orbitkorrektursystem entsprechender Präzision zu erwarten.

An Beschleunigeranlagen, an denen die transversalen Strahldimensionen im Bereich von mm liegen, ist jedoch ein Einfluß zu erwarten. An diesen kann der Effekt darüber hinaus zur Emittanzmessung benutzt werden. Eine solche, den Strahl nicht beeinflussende Meßmöglichkeit ist insbesondere für Hochenergie-Protonen- oder Ionen-Beschleunigeranlagen, an denen eine Messung der Emittanz mittels Synchrotronstrahlung nicht möglich ist, von großem Interesse. Hierzu sind allerdings noch weitere Arbeiten, insbesondere zur Realisierung einer hochpräzise kalibrierten Strahllagemonitor-Quadrupolmagnet-Einheit, notwendig.

Anhang A

Vorschlag für einen Emittanzmonitor mit kapazitiven Pickup-Elektroden

Hier wird detaillierter auf die in Abschnitt 3.5 beschriebene Möglichkeit eingegangen, die Emittanz eines Teilchenstrahls unter Verwendung eines Monitors mit kapazitiven Pickup-Elektroden zu messen.

Die analytische Herleitung des Zusammenhangs zwischen den Antwortfunktionen eines solchen Monitors und den Varianzen der gaußförmigen, transversalen Ladungsverteilung für eine feste Position (x, y) des Ladungsschwerpunktes, liefert folgenden Zusammenhang (Abschnitt 3.2.2):

$$A(\sigma_x, \sigma_y) = A(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j \cdot (\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^j \quad (\text{A.1})$$

Wobei die Entwicklungskoeffizienten a_j mit den Koeffizienten der Taylorentwicklung der Signalfunktion S verknüpft sind. Die Antwortfunktionen lassen sich demnach als Polynome der Variable $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ schreiben. Ist dieser Zusammenhang bekannt, läßt sich aus der an einer festen Strahlposition gemessenen Antwortfunktion die Differenz der Quadrate der Strahlbreiten bestimmen und dann gemäß der in Abschnitt 3.5 vorgestellten Formeln die Emittanz berechnen.

Um dies zu ermöglichen, wurde der in Abbildung A.1 schematisch dargestellte Monitor mit nur 2 Pickup-Elektroden entworfen. In diesem wird das Profil der Vakuumkammer weitgehend fortgeführt, es sind jedoch im Unterschied zum DELTA-Strahllagemonitor nur 2 Pickup-Elektroden vorgesehen. Diese befinden sich jeweils zentriert in der Ober- und der Innenseite des Monitors. 2 Pickup-Elektroden sind notwendig, um durch eine Normierung Meßsignale, die vom Strahlstrom unabhängig sind, zu erhalten und die Verwendung einer Meßelektronik nach dem Prinzip der DELTA-Lagemelektronik zu ermöglichen.

Für diesen Monitor wurden die Antwortfunktionen des oberen A_O und des inneren Pickup A_I für verschiedene Strahlbreiten durch numerische Integration

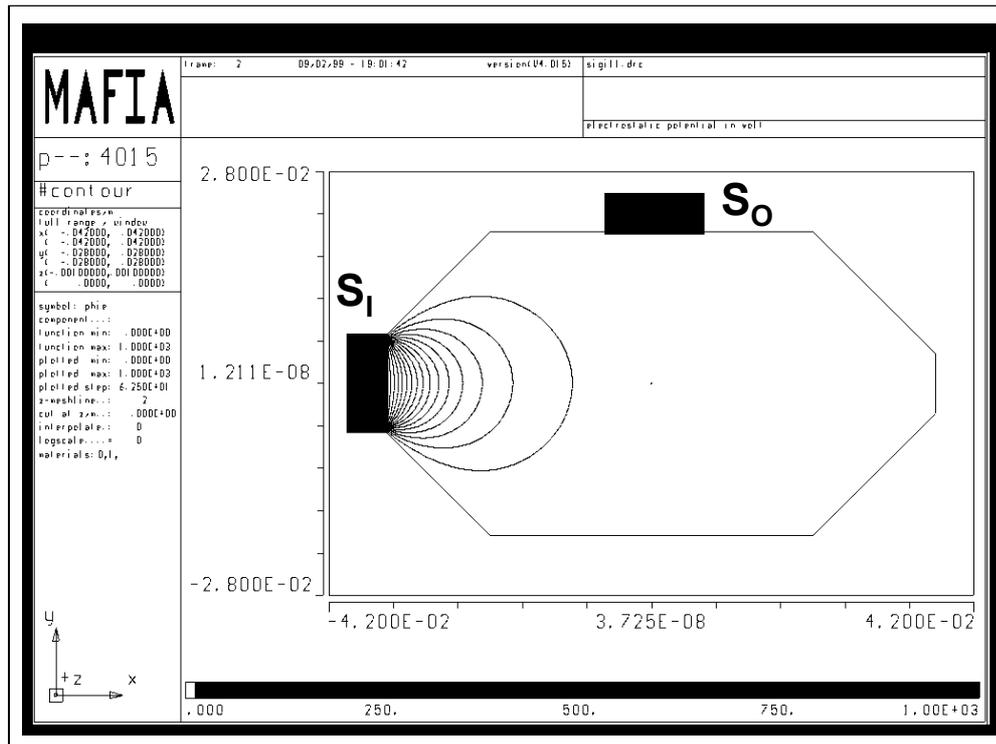


Abbildung A.1: Schematischer Aufbau eines zur Emittanzmessung entwickelten Monitors mit 2 kapazitiven Pickup-Elektroden. Die Signalfunktion S_I des innenliegenden Pickup wurde mit MAFIA berechnet und ist durch 16 äquidistante Isosignallinien repräsentiert.

gemäß Gleichung 3.8 aus den mit MAFIA berechneten Signalfunktionen S_O und S_I bestimmt. Um ein normiertes, strahlstromunabhängiges Signal zu erhalten, wird aus den beiden Antwortfunktionen folgender Quotient gebildet:

$$A_I^r = \frac{A_I}{A_I + A_O} \quad (\text{A.2})$$

Die relative Abweichung dieses Wertes ΔA_I^r bezogen auf die Signalfunktion S_I wurde in der Mitte des Monitors bei $(x = 0\text{mm}, y = 0\text{mm})$ für verschiedene Werte von σ_x und σ_y berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung A.2 dargestellt. Man erkennt den linearen Zusammenhang zwischen der Veränderung der Antwortfunktion und dem Wert von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$.

Dies gibt die einfache Möglichkeit, den funktionalen Zusammenhang zu invertieren und ein Polynom 4ten-Grades an die Punktepaare $\{\Delta A_I^r(\sigma_x^2 - \sigma_y^2), \sigma_x^2 - \sigma_y^2\}$ anzupassen. Als Ergebnis erhält man:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 - \sigma_y^2 [mm^2] = & 0,00531 + 1,94933 \cdot z - 1,0700 \cdot 10^{-3} \cdot z^2 \\ & - 1,40398 \cdot 10^{-4} \cdot z^3 - 1,31933 \cdot 10^{-5} \cdot z^4 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

mit $z = \Delta A_I^r(z) [\%]$

Die relative Abweichung der mit dem o.g. Polynom berechneten Werte von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ von den vorgegebenen Werten ist im ganzen Datenbereich kleiner 1% und liegt für Werte von $|\sigma_x^2 - \sigma_y^2| > 1mm^2$ unter 0.1%.

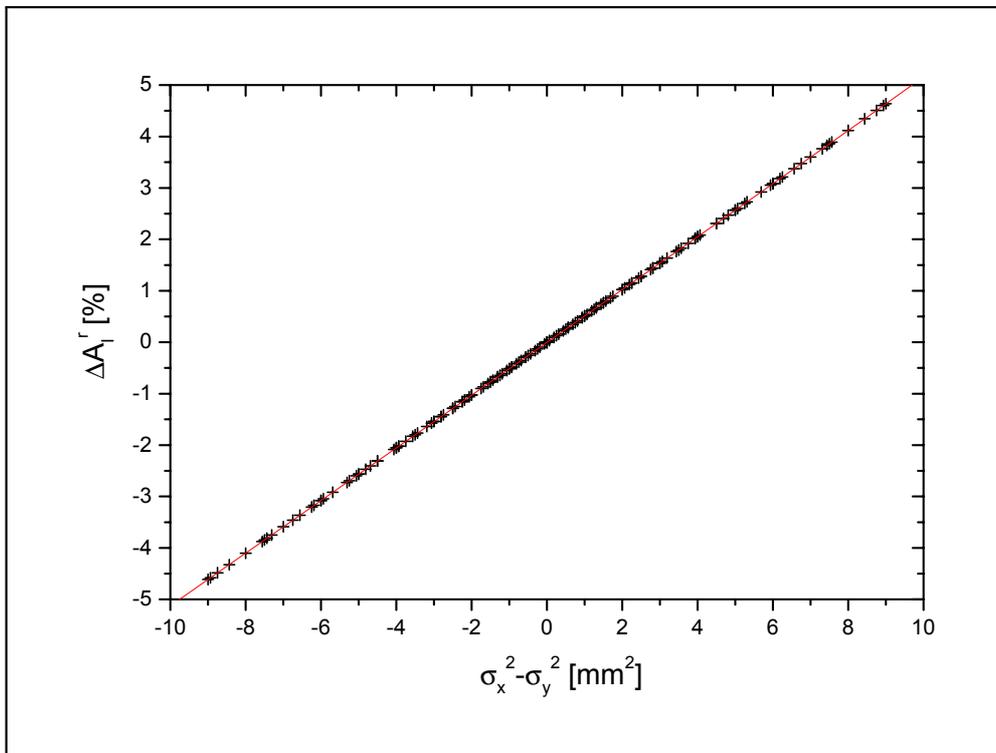


Abbildung A.2: Zusammenhang zwischen $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ und der normierten Antwortfunktion A_I^r der inneren Pickup-Elektrode. Es wurde ein Bereich von $\sigma_x, \sigma_y \in \{0mm; 0,25mm; \dots; 3mm\}$ untersucht und die relative Abweichung der Antwortfunktion, bezogen auf deren Wert für $\sigma_x = 0mm$ und $\sigma_y = 0mm$, aufgetragen. Die Berechnung wurde für eine Strahlposition in der Mitte des Monitors durchgeführt. Man erkennt den nahezu linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen.

Moderne Strahllagemesselektroniken erreichen eine relative Auflösung der Meßsignale von $\Delta S/S < 0,005\%$ und erlauben damit eine Genauigkeit von $0,01\text{mm}^2$ in der Bestimmung von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$.

Bisher ist davon ausgegangen worden, daß sich der Teilchenstrahl zentriert im Monitor an einer wohldefinierten Position befindet. Jede Abweichung der Strahllage führt zu einer Veränderung der Werte der Antwortfunktionen und damit zu einem anderen Wert von A_I^r . Dieser täuscht dann trotz konstanter Strahldimensionen eine Veränderung des Wertes von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ vor. Um den Einfluß von Lagefehlern auf die Messung zu untersuchen, wurden die Antwortfunktionen A_O und A_I an Punkten mit je $0,25\text{mm}$ Abstand in x - und y -Richtung von der Monitormitte berechnet. Daraus wurde der Einfluß auf die Veränderung des Wertes von ΔA_I^r abgeschätzt. In linearer Näherung, die für diese kleinen Abstände in guter Näherung erfüllt ist, gilt, daß eine Verschiebung des Strahls um $1\mu\text{m}$ in x - oder y -Richtung zu einer Veränderung des Wertes ΔA_I^r von $0,007\%$ führt.

Zusammengefaßt läßt sich folgendes festhalten: Die Fertigung eines für die Emittanzmessung geeigneten Strahllagemonitors mit modernen CNC-Fräßmaschinen ist mit einer Genauigkeit von $< 10\mu\text{m}$ möglich. Durch eine geeignete Auswahl der Pickup-Elektroden und eine sorgfältige Durchführung des Einbaus der Elektroden ist es möglich, einen Monitor mit 2 Pickup-Elektroden zu bauen, deren Signalfunktionen mit hoher Präzision mit einem Programm wie MAFIA berechnet werden können und aus denen sich dann die Antwortfunktionen bestimmen lassen. Dies ermöglicht, wenn der Strahl mit einer Auflösung von $< 10\mu\text{m}$ in der Monitormitte plaziert wird, den Wert von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ mit einer absoluten Genauigkeit von $0,13\text{mm}^2$ zu bestimmen. Ob diese absolute Genauigkeit für eine Messung ausreichend ist, hängt von den Strahldimensionen ab. An einer Synchrotronstrahlungsquelle wie DELTA, an der maximale Werte von $\sigma_x = 0,622\text{mm}$ und $\sigma_y = 0,057\text{mm}$ erreicht werden, beträgt der Wert von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2 = 0,384\text{mm}^2$. Der Meßfehler liegt somit in der Größenordnung von 30% , was eine sinnvolle Emittanzmessung nicht zuläßt. An Beschleunigeranlagen, an denen Werte von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ größer 2mm^2 erreicht werden, beträgt der Fehler dagegen nur 7% und eine Messung ist sinnvoll durchführbar. Insbesondere für Protonen-Beschleuniger, an denen die zerstörungsfreie Messung mit Synchrotronstrahlung nicht oder nur eingeschränkt gegeben ist, kann eine solche Meßmöglichkeit von Interesse sein.

Abschließend bleibt die Frage zu beantworten, wie für einen Strahl mit nicht bekannten Strahldimensionen eine Positionierung in der Mitte des Monitors am Referenzpunkt der Messung möglich ist. Dazu gibt es 2 Möglichkeiten:

1. Der Monitor mit 2 Pickup-Elektroden wird um 4 Elektroden ergänzt, die wie im DELTA-Strahllagemonitor (Abbildung 4.1) angeordnet sind. Dabei muß darauf geachtet werden, daß der Monitor streng symmetrisch aufgebaut wird und die Signalfunktionen der zusätzlichen Pickup-Elektroden identisch sind. Sind diese Anforderungen erfüllt, so ist die Lagemessung in bezug auf die elektrische Mitte dieses Monitors unabhängig von den Strahldimensionen möglich;¹ Ablagen von bis zu $0,25\text{mm}$ lassen sich mit einer Genauigkeit

¹Sofern die transversale Ladungsverteilung symmetrisch ist (Abschnitt 3.4).

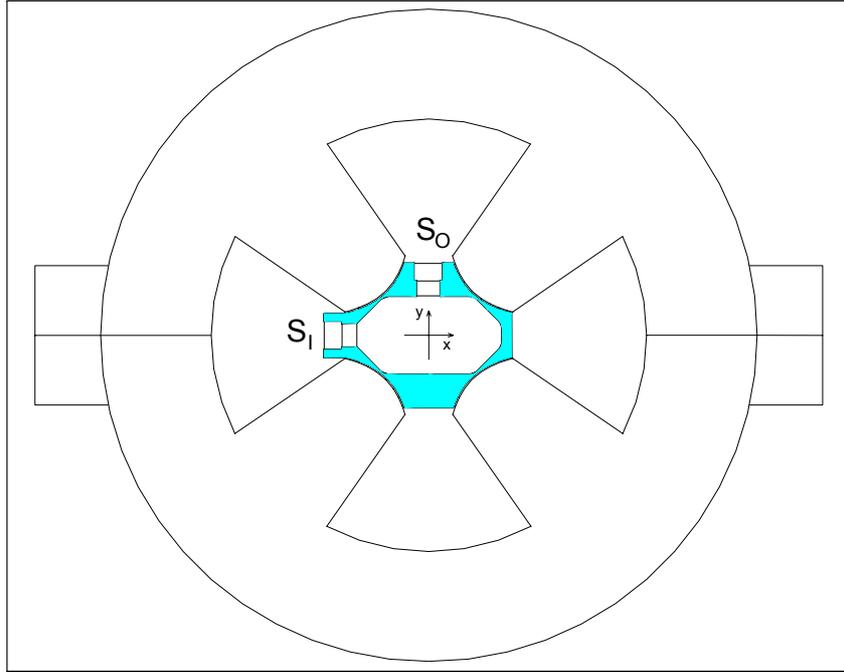


Abbildung A.3: Entwurf eines Emittanzmonitors mit kapazitiven Pickup-Elektroden. Ein Monitor mit 2 Elektroden ist dazu mit einem dedizierten Quadrupolmagneten zu einer Meßeinheit verbunden. Der Quadrupol erlaubt die strahlbreitenunabhängige Zentrierung des Strahls in der Mitte, d.h. an der Referenzposition, des Monitors. Außerdem ermöglicht er die Messung der Betafunktionen am Ort des Monitors.

von $< 10\mu m$ bestimmen (Abbildung 3.7, S.45). Nachteil dieser Methode ist der erhöhte Aufwand in der Fertigung und der Kalibration des Monitors, da diese auf einem Antennenmeßstand [27] mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden muß. Weiterhin ist zur Bestimmung der Emittanz nach dem in Abschnitt 3.5 beschriebenen Verfahren die Kenntnis der Betafunktionen am Ort der Messung von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ notwendig.

2. Der Monitor mit 2 Pickup-Elektroden wird mit einem dedizierten Quadrupolmagneten, wie in Abbildung A.3 dargestellt, verknüpft. Durch Einfräsungen an der Außenseite des BPM wird dieser in den Polschuhen des Quadrupols gehalten und damit die Mitte des Monitors auf die Achse des Quadrupols zentriert. Durch die Positionierung der Pickup-Elektroden in der Ober- und Innenseite des Monitors ist es möglich, die Ebene der Elektroden bezogen auf die Richtung der Teilchenbahn mittig im Quadrupol zu plazieren. Dies vermeidet Probleme mit einem unter einem Winkel durch den Quadrupol passierenden Strahl (Abschnitt 6.2.2).

Die Kalibrationsmessungen an DELTA haben gezeigt, daß auf diese Weise ein Strahl mit einer Genauigkeit von $< 10\mu m$ (Abschnitt 6.3) auf der Qua-

drupolachse zentriert werden kann und damit eine Messung von $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ mit einer Genauigkeit von $< 0,13mm^2$ möglich ist. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, daß der Quadrupol eine Messung der Betafunktion direkt am Ort des Monitors, wie in Abschnitt 6.6.1 beschrieben, erlaubt. Wird die Messung an Positionen durchgeführt, an denen die Dispersion gleich Null ist, können alle zur Bestimmung der Emittanz notwendigen Parameter lokal gemessen werden. Somit kann der Monitor als echter Emittanzmonitor bezeichnet werden. Eine Referenzierung der elektrischen Mitte des Monitors und der Achse des Quadrupols ist durch eine präzise Fertigung aller Bauteile möglich. Diese kann überprüft werden, indem der Monitor mit einem Draht in koaxialer Anordnung als Strahlsimulation vermessen wird und dieser Draht gleichzeitig für die Bestimmung der Quadrupolachse mittels der Pulsed-Wire-Methode [45] genutzt wird.

Um eine direkte Messung der Emittanz nach dieser Methode zu ermöglichen, ist der Einbau von 2 Monitoren dieses Typs an geeigneten Stellen des Beschleunigers notwendig (Abschnitt 3.5). Ob der Aufwand gerechtfertigt ist, muß anhand der Notwendigkeit und Aufgabe der Emittanzmessung im Einzelfall entschieden werden.

Literaturverzeichnis

- [1] LHC Study Group, *The Large Hadron Collider Conceptual Design*, CERN/AC/95-05 (Yellow Book), CERN, Genf, Schweiz, 1995
- [2] J.M. Zazula et al., *Design Studies of the LHC Beam-Dump*, LHC Project Report 112, CERN, Genf, Schweiz, 1997
- [3] D. Trines et al., *Status of the TESLA Design*, Proceedings LINAC98, Chicago, USA, 1998
- [4] J. Rossbach et al., *Studies on a Free Electron Laser for the TESLA Test Facility*, Proceedings PAC95, Dallas, USA, 1995
- [5] R. Lorentz et al., *Beam Position Measurements Inside the FEL-Undulator at the TESLA Test Facility Linac*, Proceedings DIPAC97, Frascati, Italien, 1997
- [6] R.G. Johnson et al., *Performance of the Beam Position Monitor System for the SLAC PEP-II B Factory*, Proceedings BIW98, Stanford, USA, 1998
- [7] R.J. Bakker et al., *Fast and Flexible BPM-System: Valuable Commissioning Tool for BESSY II*, Proceedings EPAC98, Stockholm, Schweden, 1998
- [8] K. Wille, *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, 2. Auflage, Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1996
- [9] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics Part I+II*, Springer Verlag, 1993 und 1995
- [10] S. Cramm, *Auslegung und Optimierung eines Synchrotron-Strahlrohres für höchste Auflösung am DELTA-Speicherring, Dortmund*, IFF Jahresbericht 1993, Forschungszentrum Jülich, Jülich, 1994
- [11] W.H. Press et al., *Numerical Recipes in C*, Second Edition, Cambridge University Press, 1992
- [12] M. Satoh et al., *A New COD Correction Method for Orbit Feedback*, Proceedings EPAC98, Stockholm, Schweden, 1998
- [13] J.A. Carwardine, *Real-Time Orbit Feedback at the APS*, Proceedings BIW98, Stanford, USA, 1998

- [14] L. Emery et al., *Advances in Orbit Drift Correction in the Advanced Photon Source Storage Ring*, Proceedings PAC97, Vancouver, Kanada, 1997
- [15] P. Röjssel et al., *Vibration Measurements on the MAXII Beam*, Proceedings EPAC98, Stockholm, Schweden, 1998
- [16] V. Schlott et al., *New Digital BPM System for the Swiss Light Source*, Proceedings DIPAC99, Chester, England, 1999
- [17] R.P. Walker, *Overview of Synchrotron Radiation and Free-Electron-Laser Projects*, Proceedings EPAC98, Stockholm, Schweden, 1998
- [18] H. Grote et al., *The MAD Program Version 8.19, User's Reference Manual*, CERN/SL/90-13, CERN, Genf, Schweiz, 1996
- [19] W.J. Corbett et al., *Debugging Real Accelerators*, SLAC, Stanford, USA
- [20] G. LeBlanc et al., *Accelerator Modeling at SPEAR*, Proceedings PAC97, Vancouver, Kanada, 1997
- [21] V. Kiselev et al., *A Method for Measurement of Transverse Impedance Distribution Along Storage Ring*, Proceedings DIPAC99, Chester, England, 1999
- [22] T.O. Raubenheimer, *Tolerances to Limit the Vertical Emittance in Future Storage Rings*, SLAC-PUB-4937, Stanford Linear Accelerator Centre, Stanford, USA, 1991
- [23] C. Stenger, *Messung der lokalen Betafunktionen im Speicherring DELTA*, Diplomarbeit, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, Dortmund, 1999
- [24] J.K. Ousterhout, *Tcl und Tk*, 1. Auflage, Addison-Wesley GmbH, München, 1995
- [25] R. Heisterhagen, *Entwicklung eines neuartigen Emittanz-Monitors mit elektrostatischen Elektroden*, Dissertation, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, Dortmund, 1993
- [26] *MAFIA Manual, Version 4.0*, CST Gesellschaft für Computer-Simulationstechnik, Darmstadt, 1997
- [27] A. Jankowiak, *Kalibration der DELTA-Strahllagemonitore*, Diplomarbeit, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, Dortmund, 1994
- [28] I.N. Bronstein et al., *Taschenbuch der Mathematik*, S. 66, 23. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun, 1987
- [29] C. Biscari et al., *DAΦNE Commissioning*, Proceedings EPAC98, Stockholm, Schweden, 1998

- [30] S. Kurokawa, *Present Status of KEK-B Project*, Proceedings EPAC98, Stockholm, Schweden, 1998
- [31] J. Dorfan, *PEP-II Status Report*, Proceedings EPAC98, Stockholm, Schweden, 1998
- [32] K. Dunkel, *Entwicklung und Test einer Meßelektronik zur Arbeitspunktbestimmung am Synchrotron BoDo*, Diplomarbeit, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, Dortmund, 1996
- [33] N. Marquardt et al., *The DELTA Vacuum System*, Proceedings EPAC96, Sitges, Spanien, 1996
- [34] D. Nölle et al., *First Lasing of the FELICITA I Storage Ring FEL in the Visible*, XXI. FEL Konferenz, Hamburg, 1999
- [35] J. Bergoz, *Beam Position Monitor User's Manual*, BERGOZ Precision Beam Instrumentation, Crozet, Frankreich, 1998
- [36] K. Unser, *New Generation Electronics Applied to Beam Position Monitors*, Proceedings BIW96, Argonne National Laboratory, USA, 1996
- [37] J.A. Hinkson et al., *Precision Analog Signal Processing for Beam Position Measurements in Electron Storage Rings*, Proceedings DIPAC95, Travemünde, 1995
- [38] D. Schirmer et al., *Standardization of the DELTA Control System*, Proceedings ICALEPCS99, Trieste, Italien, 1999
- [39] H. Quick, *First Laser Operation of FELICITA I in the Visible*, Dissertation, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, Dortmund, 1999
- [40] P. Rösel, *A Beam Position Measurement system using quadrupol magnets magnetic centra as the position reference*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A343, pp. 374-382, 1994
- [41] B. Dehning et al., *Dynamic Beam Based Calibration of Beam Position Monitors*, Proceedings EPAC98, Stockholm, Schweden, 1998
- [42] D. Zimoch, *Entwicklung von Strahldiagnosetools unter Berücksichtigung Objektorientierter Ansätze*, Diplomarbeit, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, Dortmund, 1996
- [43] F. Brinker, *The DELTA Storage Ring and Booster Magnets*, DELTA Interner Report 93-5, Dortmund, 1993
- [44] U. Berges et al., *Status of the DELTA synchrotron-light-monitoring-system*, Proceedings DIPAC99, Chester, Großbritannien, 1999
- [45] F. Brinker et al., *Precision Alignment of BPM's with Quadrupol Magnets*, LINAC96, Genf, Schweiz, 1996

Danksagung

An dieser Stelle sei allen gedankt, die zum erfolgreichen Abschluß dieser Arbeit beigetragen haben:

Meinem Doktorvater Prof. Dr. Thomas Weis, der in vielen Diskussionen regen Anteil an meiner Arbeit genommen hat, sowie Herrn Prof. Dr. Eberhard Jaeschke, der freundlicherweise das Koreferat übernommen hat,

Meinen Kollegen, die viele der notwendigen Meßschichten erst ermöglichten,

Den Mitarbeitern der Elektronikwerkstatt, der Mechanikwerkstatt sowie der Infrastruktur-Gruppe, für Ihren Anteil am Gelingen der Arbeit,

Carsten Stenger, der mich bei einem Großteil der Installationen unterstützt hat,

Christian Piel, Dr. Henrich Quick und Dr. Renate Wunstorff für das Korrekturlesen,

Leah und Katja, daß Ihr bei mir seid!