Implementierung eines Orbitkorrektursystems an der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA

Dissertation zur Erlangung des Grades Dr. rer. nat.

Dipl. Phys. Dirk Zimoch

Angefertigt am Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung der Universität Dortmund

3. September 2002

1. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Wille
2. Gutachter: Prof. Dr. Metin Tolan

Vertreter der wiss. Mitarbeiter: Dr. Christian Sternemann

Tag der mündlichen Prüfung: 18.10.2002

für Elke

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

DELTA ist eine 1.5 GeV Elektronenspeicherring-Anlage an der Universität Dortmund und dient internen und externen Nutzern als Synchrotronstrahlungsquelle.

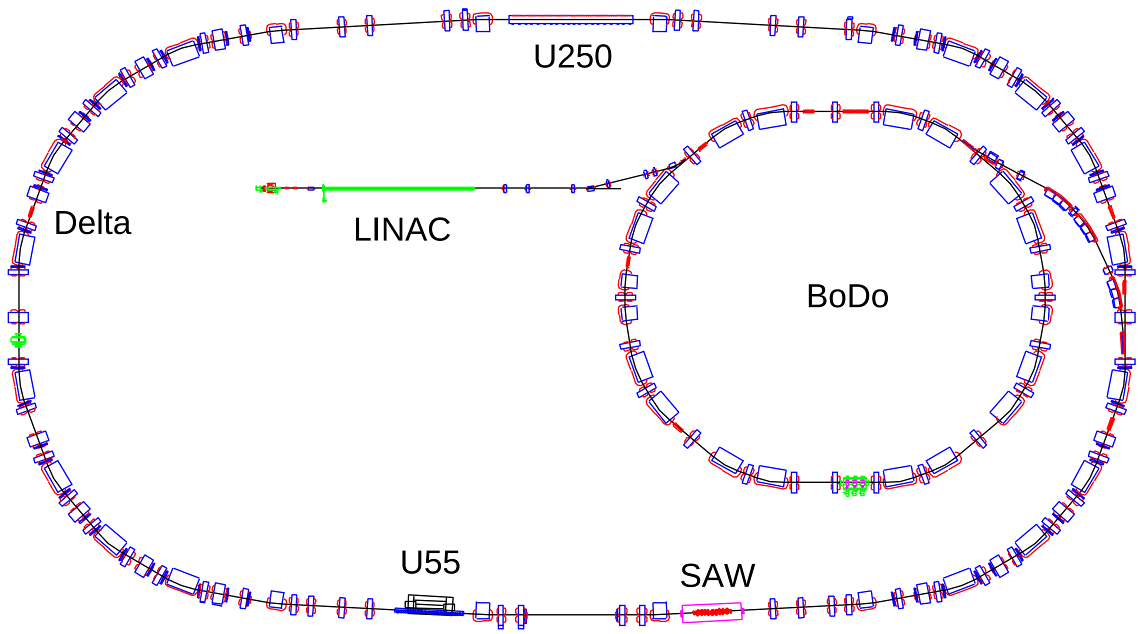


Abbildung 1.1: *Die Komponenten des Elektronenbeschleunigers DELTA*

Abbildung 1.1 zeigt die Beschleunigeranlage DELTA, bestehend aus einem 75 MeV Linearbeschleuniger (LINAC), einem als gerampten Speicherring ausgelegten 1.5 GeV Boostersynchrotron (BoDo) und dem 1.5 GeV Speicherring (Delta[1]). Man erkennt drei Insertion Devices[2]: Den elektromagnetischen Undulator U250 im Norden, den Permanentma-

[1] Anmerkung zur Schreibweise: „DELTA“ (in Großbuchstaben) bezeichnet die gesamte Anlage, „Delta“ nur den Speicherring

[2] Insertion Devices sind hier in gerade Strecken eingebaute spezielle Magnete zur Erzeugung intensiver Synchrotronstrahlung.

gnetundulator U55 im Südwesten und den supraleitenden asymmetrischen Wiggler SAW im Südosten.

Da DELTA auch als Testmaschine für beschleunigerphysikalische Entwicklungen geplant wurde, ergaben sich einige besondere Aspekte im Design, die so an anderen Synchrotronstrahlungsquellen nicht zu finden sind.

Beispielhaft sei hier die geringe Symmetrie der Optik angeführt. Im Gegensatz zu anderen Speicherringen mit einer Symmetrie von 4, 8, 12 oder noch höher, hat Delta die Symmetrie 2, bei Betrieb des supraleitenden Wigglers sogar nur 1.

Weiterhin gibt es drei verschiedene Familien von Ablenkdipolen – außer den 20°-Hauptdipolmagneten besitzt der Speicherring noch je vier 3°- und 7°-Dipolmagnete, die sich zwischen den geraden Abschnitten im Norden und Süden befinden.

Ein anderes Beispiel sind Magnete, bei denen sich verschiedene Komponenten auf demselben Eisenjoch befinden. Auf das Joch von Quadrupolmagneten sind weitere Spulen montiert, die zusätzlich Sextupolfelder und Dipolfelder erzeugen.

Im Zuge der zunehmenden Nutzung von DELTA als Synchrotronstrahlungsquelle war es von großer Wichtigkeit, besonders die Reproduzierbarkeit der Strahllage in den Insertion Devices zu gewährleisten und eine Drift über längere Zeiträume zu verhindern. Im Bereich der Injektion in den Speicherring ist ebenfalls eine konstante Strahllage notwendig, um eine gleichbleibende Injektionseffizienz zu ermöglichen. Aber auch im Rest des Speicherrings darf sich der Orbit nicht zu stark von seiner Sollbahn entfernen, da es ansonsten zu Veränderungen der Fokussierung und zu einer Reduzierung der Strahllebensdauer oder zur Aufweitung des Strahlquerschnitts kommen kann.

In der Vergangenheit war es problematisch, mit Hilfe von theoretischen Optikmodellen die Strahllage zu korrigieren, da diese die Verhältnisse des realen Speicherrings nicht exakt genug wiedergaben. Einige Maschinenparameter sind nicht hinreichend genau bekannt. Außerdem verändern Nichtlinearitäten das Maschinenverhalten. Ziel dieser Arbeit war es daher, die Korrektur der Strahllage auf der Grundlage von Daten durchzuführen, die an der realen Maschine gemessenen wurden. Vergleiche dieser Messungen mit den Vorhersagen der Modellrechnungen sind die Grundlage für Verbesserungen der Modelle.

Diese Arbeit enthält zunächst eine Einführung in die theoretischen Grundlagen der Strahlbewegung in einem Speicherring. Es wird kurz auf die Begriffe lineare Strahloptik, Betafunktionen und Dispersion eingegangen. Danach werden Störungen der Bahn des Elektronenstrahls und ihre Ursachen diskutiert.

Das nächste Kapitel befasst sich mit der Korrektur der Strahllage. Es wird die Orbit-Response-Matrix eingeführt und darauf beruhende Korrekturverfahren erläutert. Dabei werden die mathematischen Formeln entwickelt, welche Grundlage der Korrekturalgorithmen sind.

Die Geräte, mit denen die Strahllage bestimmt und beeinflusst werden kann, werden im darauffolgenden Kapitel vorgestellt. Speziell sind dies die Strahllagemonitore und die Korrekturmagnete, sowie die 3°- und 7°-Dipolmagnete und das Hochfrequenzsystem. Details zur Ansteuerung der Korrekturmagnete finden sich im Anhang.

Die Rechner gestützte Ansteuerung aller Komponenten des Beschleunigers erfolgt mit Hilfe des Kontrollsystems EPICS. Das fünfte Kapitel gibt eine kurze Einführung in EPICS und erläutert die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Treiberprogramme, welche zur Ansteuerung der Geräte notwendig sind. Im Anhang werden Details zum StreamDevice-Treiber beschrieben, den mehrere andere große Institute von DELTA übernommen haben.

Im sechsten Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Mess- und Steuerprogramme mit ihren Benutzeroberflächen vorgestellt, darunter auch das Orbitkorrekturprogramm, welches die zuvor diskutierten Korrekturverfahren implementiert.

Danach werden die durchgeführten Messungen beschrieben und die Ergebnisse beurteilt. Es sind dies die Vermessung der Korrekturspulennetzgeräte, der Störungen der Elektronenbahn und ihrer Ursachen, der Orbit-Response-Matrix sowie der Dispersion. Außerdem werden die Korrekturverfahren bewertet.

Schließlich folgen ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und eine Zusammenfassung dieser Arbeit.

Kapitel 2

Die Elektronenbahn im Speicherring

Die geschlossene Bahn, auf welcher sich der Ladungsschwerpunkt der Elektronen im Speicherring bewegt, nennt man den Orbit. Idealerweise liegt dieser Orbit in der Mitte der Vakuumkammer und geht zentral durch alle Quadrupolmagnete.

Die Bewegung der Elektronen wird in einem Koordinatensystem beschrieben, welches entlang dieser Sollbahn mitbewegt wird. Dabei gibt die Koordinate s die Position auf der Sollbahn bezüglich eines beliebigen Startpunktes an (bei Delta die Mitte der Westkurve), während die Koordinaten x und z die Abweichungen von der Sollbahn in horizontaler und vertikaler Orientierung, jeweils senkrecht zu s, beschreiben. Im Allgemeinen kann man voraussetzen, dass sich die Sollbahn in der horizontalen Ebene befindet. Bei Delta ist die Bewegungsrichtung der Elektronen im Uhrzeigersinn. Positive x-Werte entsprechen einer Ablage nach außen, positive z-Werte einer Ablage nach oben.

2.1 Betatronschwingung und Arbeitspunkt

Durch die fokussierende Wirkung der Magnetstruktur führen die einzelnen Teilchen in einem Elektronenstrahl Schwingungen um den Strahlschwerpunkt aus. Diese sogenannte Betatronschwingung hat in x- und z-Orientierung jeweils eine ortsabhängige Amplitude.

$$x_i(s) = A_{x,i}(s)\cos(\psi_x(s) + \phi_{x,i}) \tag{2.1}$$

$$z_i(s) = A_{z,i}(s)\cos(\psi_z(s) + \phi_{z,i}) \tag{2.2}$$

Dabei sind $A_{x,i}(s)$ und $A_{z,i}(s)$ die ortsabhängigen Schwingungsamplituden des Teilchens i in x- bzw. z-Orientierung, $\psi_x(s)$ und $\psi_z(s)$ sind die Phasenvorschübe vom Startpunkt an und $\phi_{x,i}$ und $\phi_{z,i}$ sind beliebige Anfangsphasen.

Meistens[1] kann man die Bewegungen in horizontaler und vertikaler Orientierung als weitgehend entkoppelt ansehen. Im Folgenden wird daher exemplarisch nur noch die horizontale Orientierung betrachtet. In vertikaler Orientierung gelten aber stets analoge Aussagen, soweit nicht explizit anders erwähnt.

[1] Bei einer linearen Maschine, siehe Kapitel 2.2.

Man kann die Schwingungsamplituden $A_i(s)$ in zwei Faktoren aufteilen: Der eine Faktor $\sqrt{\varepsilon_i}$ ist ortsunabhängig aber für jedes Teilchen i anders. Die sogenannte Einzelteilchen-Emittanz ε_i ist ein Maß für die Stärke der Schwingung des Teilchens i. Der andere Faktor $\sqrt{\beta(s)}$ ist für alle Teilchen gleich, aber abhängig vom Ort s. Die sogenannte Betafunktion $\beta(s)$ ist durch die Magnetstruktur bestimmt.

Somit ergibt sich für die Bahn eines Teilchens

$$x_i(s) = \sqrt{\varepsilon_i \beta(s)} \cos(\psi(s) + \phi_i)\,. \tag{2.3}$$

Den Phasenvorschub $\psi(s)$ der Schwingung erhält man durch Integration der reziproken Betafunktion über den Ort.

$$\psi(s) = \int_0^s \frac{d\sigma}{\beta(\sigma)} \tag{2.4}$$

Aus dem Phasenvorschub über dem gesamten Umfang L errechnet sich der sogenannte Arbeitspunkt Q.

$$Q \equiv \frac{\psi(L)}{2\pi} \tag{2.5}$$

Dieser gibt die Anzahl der Betatronschwingungen pro Umlauf der Teilchen im Speicherring an. Im Allgemeinen sind die Arbeitspunkte Q_x und Q_z für die horizontale und die vertikale Orientierung verschieden. Für einen stabil umlaufenden Strahl dürfen die Arbeitspunkte keine einfachen Brüche sein. In Kapitel 2.4 wird ersichtlich, weshalb insbesondere ganzzahlige Arbeitspunkte nicht erlaubt sind. Aufgrund von Kopplungen zwischen den Bewegungen in horizontaler und vertikaler Orientierung sollten sogar alle Kombinationen vermieden werden, für die gilt $a\,Q_x + b\,Q_z = c$ mit kleinen ganzen Zahlen a, b und c.

Die einzelnen Teilchen eines Strahls schwingen mit zufälligen Phasen ϕ_i. Ihre Schwingungsamplituden sind annähernd gaußverteilt. Definiert man den Strahlquerschnitt $2\sigma(s)$ über die Standardabweichung der Verteilung, so erhält man (bei einheitlicher Teilchenenergie) eine Emittanz ε für den gesamten Elektronenstrahl mit

$$\sigma(s) = \sqrt{\varepsilon \beta(s)}\,. \tag{2.6}$$

Die Betafunktion bestimmt also an jeder Stelle den Strahlquerschnitt. Abbildung 2.1 zeigt unter anderem die Wurzel der Betafunktionen für die Standardoptik von Delta.

2.2 Lineare Strahloptik

Die lineare Strahloptik stellt ein mathematisches Werkzeug bereit, mit dessen Hilfe die Bewegung von Teilchen durch die Magnetstruktur eines Beschleunigers berechnet werden kann. Es werden dabei neben magnetfreien Driftstecken nur Dipol- und Quadrupolmagnete berücksichtigt, aber keine Multipole höherer Ordnung.

Unter dieser Voraussetzung kann man die Teilchenbahn durch einen Matrixformalismus beschreiben. Ist an einer Stelle s_0 die Ablage x_0 und der Winkel $x'_0 \equiv dx/ds\,(s_0)$ der Teilchenbahn bekannt, erhält man Ablage und Winkel an einer anderen Stelle $s_1 > s_0$ durch

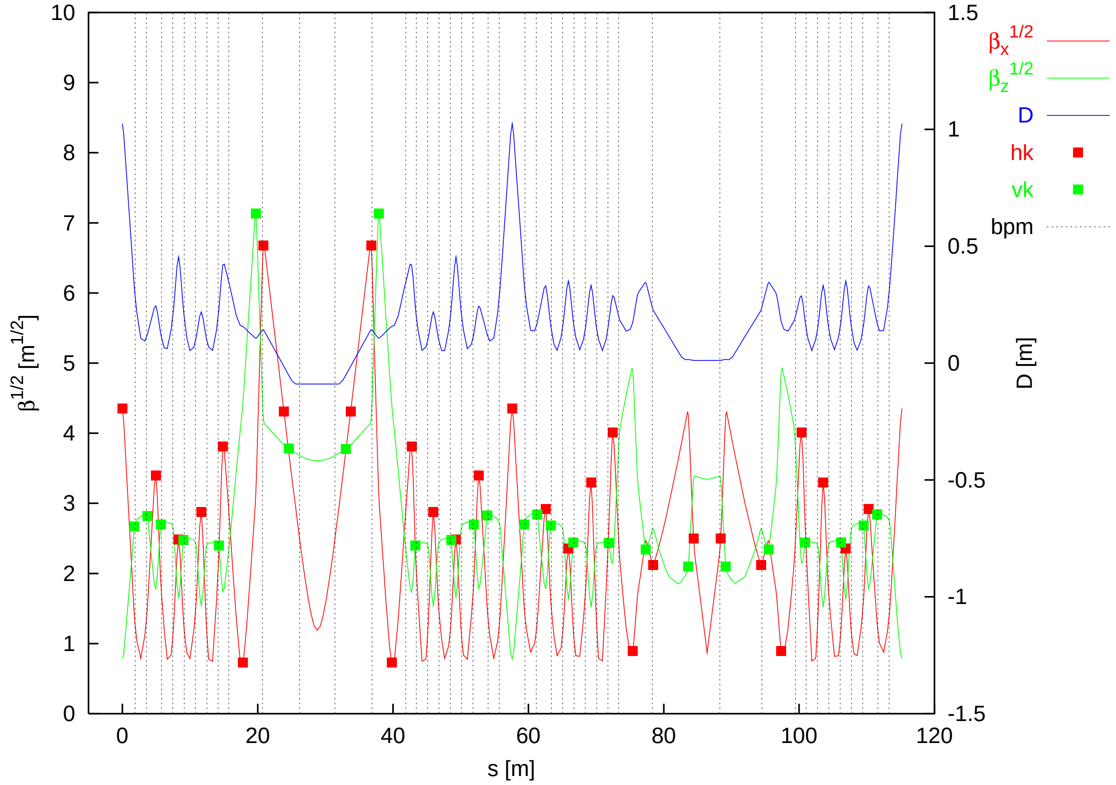


Abbildung 2.1: *Wurzel der Betafunktionen und Dispersionsfunktion in der Standardoptik (DEL-008). Die Positionen der Strahllagemonitore* (bpm) *und der Korrekturspulen* (hk *und* vk) *sind markiert.*

Multiplikation mit einer sogenannten Transfermatrix $\mathbf{M}^{0\to1}$:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{0\to1} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

Transfermatrizen für Driftstrecken, Dipole und Quadrupole sind bekannt, so dass sich durch Matrixmultiplikation Transfermatrizen für beliebige Magnetstrukturen berechnen lassen.

Sind an zwei Stellen s_0 und s_1 die Betafunktion und ihre Ableitung sowie der relative Phasenvorschub $\psi \equiv \psi(s_1) - \psi(s_0) \in [0; 2\pi Q[$ bekannt, kann man auch daraus die Transfermatrix zwischen den beiden Stellen berechnen.

$$\mathbf{M}^{0\to1} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_0}}(\cos\psi + \alpha_0 \sin\psi) & \sqrt{\beta_0\beta_1}\sin\psi \\ \frac{(\alpha_0-\alpha_1)\cos\psi-(1+\alpha_0\alpha_1)\sin\psi}{\sqrt{\beta_0\beta_1}} & \sqrt{\frac{\beta_0}{\beta_1}}(\cos\psi - \alpha_1 \sin\psi) \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

Dabei sei $\alpha(s)$ durch die Ableitung der Betafunktion definiert.

$$\alpha(s) \equiv -\frac{1}{2}\frac{d\beta}{ds}(s)$$

Weiterführende Informationen über die lineare Strahloptik findet man in der Literatur über Beschleunigerphysik, z.B. bei Wille [1], Sands [2] oder Wiedemann [3].

2.3 Dispersion und Phasenfokussierung

Weicht die Energie eines Teilchens um ΔE von der Sollenergie E ab, so beschreibt es in den Dipolmagneten eine Bahn mit einem anderen Radius als Teichen mit Sollenergie. Teilchen mit höherer Energie haben einen größeren Ablenkradius $R+\Delta x$ und laufen dadurch weiter außen um. Dies hat eine Längenänderung der Bahn zur Folge.

$$\Delta L = \oint \frac{\Delta x(s)}{R(s)} ds \tag{2.9}$$

Durch die fokussierende Wirkung der Magnetstruktur existiert auch hier wiederum eine geschlossene Bahn, ein sogenannter Dispersionsorbit $\Delta x(s) = \frac{\Delta E}{E} D(s)$. Die Funktion $D(s)$ nennt man die Dispersionsfunktion. Weil die meisten Beschleuniger eben sind, das heißt alle Dipolmagnete nur horizontal ablenken, ist Dispersion nur für den horizontalen Orbit relevant. Die Dispersionsfunktion für Delta ist ebenfalls in Abbildung 2.1 dargestellt.

Da die gespeicherten Elektronen aufgrund der abgegebenen Synchrotronstrahlung Energie verlieren, muss diese in einer Beschleunigungsstruktur wieder erhöht werden. Dabei erhalten Elektronen, die etwas zu früh eintreffen, etwas mehr Energie, später eintreffende etwas weniger. Durch die Dispersion haben die energiereicheren Teilchen dann im nächsten Umlauf einen etwas längeren Weg und treffen später ein und umgekehrt.

Dadurch führen die Elektronen gegenüber einem Teilchen ohne Energieabweichung longitudinale Schwingungen, die sogenannte Synchrotronschwingung, aus. Die Phase, in der sie das beschleunigende elektrische Hochfrequenzfeld durchlaufen, schwingt dabei um eine Sollphase. Durch die inkohärenten Schwingungen der einzelnen Teilchen bleibt der Mittelwert der Phase konstant. Man nennt diesen Effekt Phasenfokussierung.

Durch die Phasenfokussierung stellt sich stets eine Orbitlänge ein, die ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge der beschleunigenden Hochfrequenz ist.

$$L = n\lambda = \frac{nc}{f} \tag{2.10}$$

Das bedeutet aber auch, dass eine nicht zur Länge des Sollorbits passende Hochfrequenz den Elektronenstrahl als ganzes auf einen Dispersionsorbit zwingt, wobei sich die mittlere Energie der Teilchen entsprechend anpasst. Für geringe Änderungen der Frequenz entspricht die Änderung der Orbitlänge der Ableitung.

$$\frac{\Delta L}{\Delta f} \approx \frac{dL}{df} = -\frac{nc}{f^2} \tag{2.11}$$

Damit erhält man für die Bahnlängenänderung

$$\Delta L = \oint \frac{\Delta x(s)}{R(s)} ds = \frac{\langle \Delta x \rangle_{Dipole}}{R} L_{Dipole} = 2\pi \langle \Delta x \rangle_{Dipole} = -\frac{nc}{f^2} \Delta f\,. \tag{2.12}$$

Dabei bedeutet R den Ablenkradius der Dipolmagnete, L_{Dipole} ihre Gesamtlänge und $\langle\Delta x\rangle_{Dipole}$ die durchschnittliche Orbitverschiebung in den Dipolen. Diese beträgt somit in Abhängigkeit von der Frequenzänderung

$$\langle\Delta x\rangle_{Dipole} = -\frac{1}{2\pi}\frac{nc}{f^2}\Delta f\,. \tag{2.13}$$

2.4 Orbitstörungen

Während der ideale Orbit definitionsgemäß überall die Ablage Null hat, stellt sich unter dem Einfluss einer Störung ein anderer Orbit ein. Dabei handelt es sich um eine geschlossene Bahn mit einer Winkeländerung an der Störstelle. Dadurch führt jetzt auch der Strahlschwerpunkt selbst Betatronschwingungen um den Idealorbit aus.

Abbildung 2.2 zeigt einen solchen gestörten Orbit. Im Gegensatz zu den Schwingungen der Einzelteilchen um den Schwerpunkt ist diese Schwingung jedoch stationär mit einem Phasensprung an der Stelle der Störung, wie im Folgenden gezeigt wird.

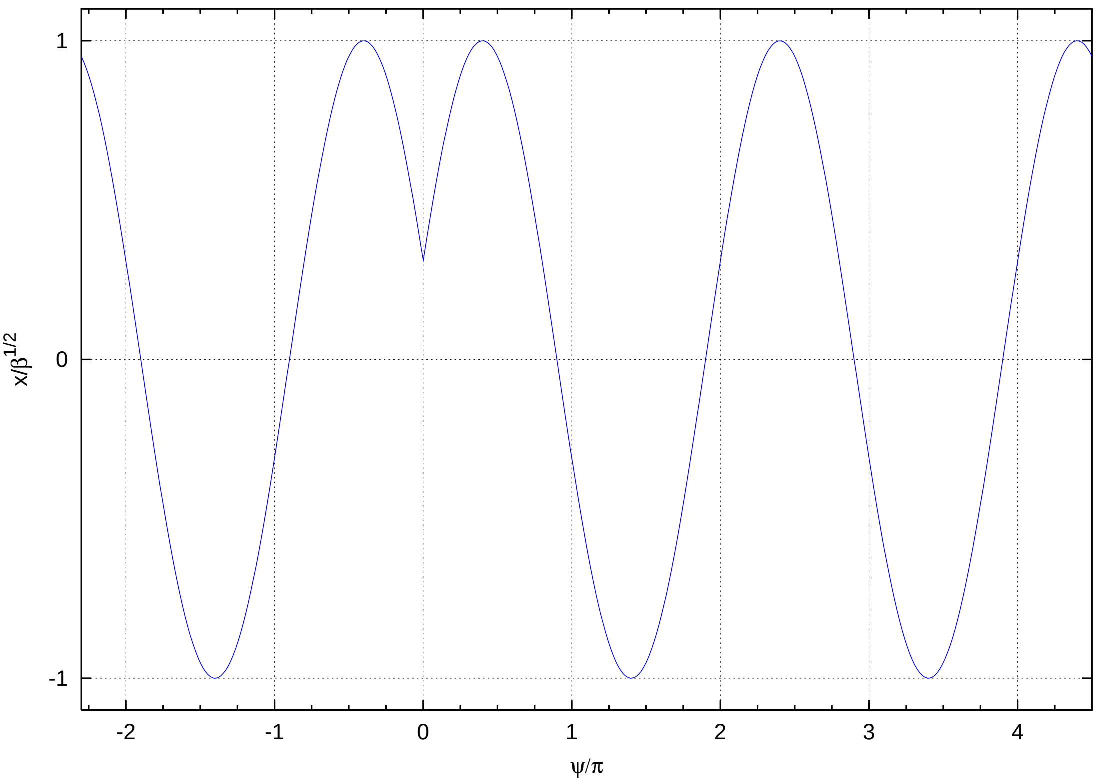


Abbildung 2.2: *Stationäre Betatronschwingung mit Phasensprung an der Störstelle. Die Skalierung der vertikalen Achse ist willkürlich und die Amplitudenmodulation durch die Betafunktion ist herausgerechnet.*

Aus Gleichung (2.8) folgt mit $\psi = 2\pi Q$ die Transfermatrix für einen vollständigen Umlauf ab der Stelle s_0.

$$\mathbf{M}^{0\to 0} = \begin{pmatrix} \cos 2\pi Q + \alpha_0 \sin 2\pi Q & \beta_0 \sin 2\pi Q \\ -\frac{1}{\beta_0}\left(1+\alpha_0^2\right)\sin 2\pi Q & \cos 2\pi Q - \alpha_0 \sin 2\pi Q \end{pmatrix} \tag{2.14}$$

Findet an der Stelle s_0 durch eine Störung eine Winkeländerung von $x_0' - \Delta x'$ auf x_0' statt, so muss hier für den Strahlschwerpunkt auf einer geschlossenen Bahn nach einem Umlauf gelten

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' - \Delta x' \end{pmatrix} = \mathbf{M}^{0\to 0} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} \tag{2.15}$$

oder

$$0 = \left(\cos 2\pi Q + \alpha_0 \sin 2\pi Q - 1\right) x_0 + \beta_0 \sin 2\pi Q x_0' \tag{2.16}$$

$$\Delta x' = \frac{1}{\beta_0}\left(1+\alpha_0^2\right)\sin 2\pi Q x_0 - \left(\cos 2\pi Q - \alpha_0 \sin 2\pi Q - 1\right) x_0', \tag{2.17}$$

woraus folgt

$$x_0 = \frac{\Delta x'}{2}\frac{\beta_0}{\tan(\pi Q)} \tag{2.18}$$

$$x_0' = \frac{\Delta x'}{2}\left(1 - \frac{\alpha_0}{\tan(\pi Q)}\right). \tag{2.19}$$

Eine einzelne Winkeländerung verändert den Orbit an der Stelle der Störung also proportional zur lokalen Betafunktion β_0. Der gestörte Orbit an einem beliebigen anderen Punkt s_i mit den optischen Funktionen β_i und α_i und dem relativen Phasenvorschub $\psi \equiv \psi_i - \psi_0$ ergibt sich durch die Transfermatrix $\mathbf{M}^{0\to i}$ zu

$$x_i = \frac{\Delta x'}{2}\sqrt{\beta_0\beta_i}\left(\frac{\cos\psi + \alpha_0 \sin\psi}{\tan(\pi Q)} + \sin\psi - \frac{\alpha_0 \sin\psi}{\tan(\pi Q)}\right) \tag{2.20}$$

$$= \frac{\Delta x' \sqrt{\beta_0\beta_i}}{2}\left(\frac{\cos\psi\cos(\pi Q) + \sin\psi\sin(\pi Q)}{\sin(\pi Q)}\right) \tag{2.21}$$

$$= \frac{\Delta x' \sqrt{\beta_0\beta_i}}{2\sin(\pi Q)}\cos(\psi - \pi Q). \tag{2.22}$$

Die Phase ψ variiert über einem Umlauf von 0 bis $2\pi Q$. Damit ist (2.22) die Gleichung einer ortsfesten Schwingung mit einem Phasensprung an der Stelle der Störung. Aus dieser Gleichung wird verständlich, dass der Arbeitspunkt nicht ganzzahlig sein darf, weil sonst der Phasensprung keine Winkeländerung des Orbits darstellen würde. Die Amplitude der Schwingung geht in der Nähe von ganzzahligen Q gegen unendlich.

Bei mehreren verteilten Störquellen an den Stellen s_k überlagern sich die einzelnen Effekte zum realen Orbit

$$x_i = \frac{\sqrt{\beta_i}}{2\sin(\pi Q)}\sum_k \sqrt{\beta_k}\Delta x_k' \cos(\psi_i - \psi_k - \pi Q). \tag{2.23}$$

2.5 Störquellen

Ablenkungen des Elektronenstrahls von der Sollbahn werden durch elektromagnetische Störfelder verursacht. Durch die abschirmende Wirkung der metallischen Vakkumkammer kann man Einflüsse äußerer elektrischer Felder weitgehend ausschließen. Es gibt jedoch verschiedene Ursachen für magnetische Störfelder. Dazu gehören auch Fehler in der Magnetstruktur des Speicherrings.

Im Folgenden werden drei Arten von Störungen genauer erläutert: Dipolfeldfehler, Fehlaufstellungen und Streufelder. Je nach Ursache kann das Zeitverhalten statisch, driftend, schwingend oder gepulst sein. Nicht jedes Zeitverhalten lässt sich gleich gut korrigieren. Schnell schwingende oder gepulste Störungen können zu schnell für eine effektive Orbitkorrektur sein.

2.5.1 Dipolfeldfehler

Fertigungstoleranzen der Ablenkdipole führen zu einer zu großen oder zu geringen Strahlablenkung in einzelnen Dipolmagneten. Dies entspricht statischen Störfeldern, die zu Ablenkungen der Elektronenbahn nach innen oder nach außen führen.

Instabile Netzgeräte können Schwingungen von einigen Hertz bis Kilohertz verursachen. Diese übertragen sich nicht nur bei Dipolen direkt auf den Strahl, sondern auch bei allen höheren Multipolen, in denen der Orbit nicht durch die magnetische Mitte verläuft (siehe auch Kapitel 2.5.2).

Auch Kurzschlüsse zwischen den einzelnen Windungen eines Magneten verursachen ähnliche Störungen. Je nachden, ob der Kurzschluss dauerhaft besteht oder sporadisch auftritt, ist auch der Orbit statisch gestört oder springt plötzlich zwischen zwei Zuständen.

Insertion Devices können zu Orbitstörungen führen, wenn ihr Feldintegral $\int B ds$ nicht Null ergibt. Dazu kann es kommen, wenn der Feldabgleich fehlerhaft ist oder wenn sich die Felder im Laufe der Zeit ändern.

Bei Delta ist der supraleitende asymmetrische Wiggler eine Quelle von Orbitstörungen. Im sogenannten Dauerstrombetrieb, bei dem der Magnetstrom ohne externe Netzgeräte in den supraleitenden Spulen keist, treten ohmsche Verluste in Lötstellen auf. Im Laufe von einigen Stunden verlieren die Magnete dadurch an Feldstärke. Da aber drei verschiedene Stromkreise mit unterschiedlichen Induktivitäten an der Bildung des asymmetrischen Magnetfeldes beteiligt sind, verändern sich die Felder ungleichmäßig. Dadurch heben sich die ablenkenden Effekte der einzelnen Magnetpole nach einiger Zeit nicht mehr exakt auf.

Während der Akkumulation von Elektronen im Speicherring Delta wechselt die Strahlenergie im Booster periodisch innerhalb von einigen Sekunden zwischen der Endenergie des Linearbeschleunigers und der Energie des Speicherrings. Dabei ist eine Schwankung des Orbits im Speicherring zu beobachten. Dieser Effekt ist wahrscheinlich auf ein Übersprechen zwischen den verschiedenen Stromversorgungsnetzen zurückzuführen.

Weiterhin gibt es bei Delta zusätzlich zu den in Reihe geschalteten 20°-Dipolmagneten noch kürzere 3°- und 7°-Dipole. Diese werden von eigenen Netzgeräten versorgt und haben ein anderes Sättigungsverhalten als die 20°-Dipole. Bei Fehlern in der Bestromung dieser Dipole ergeben sich hier ebenfalls statische Störfelder.

2.5.2 Fehlaufstellungen von Quadrupolen

Da sich in Quadrupolmagneten das Magnetfeld linear mit dem Abstand zur Mitte ändert, bewirkt eine transversale Fehlaufstellung um Δx eine Verschiebung des Feldnullpunktes. Dies entspricht einem zusätzlichen Dipolfeld ΔB_z, welches dem Quadrupolfeld überlagert ist (siehe Abbildung 2.3). Entsprechend erzeugt eine Fehlaufstellung um Δz ein Störfeld ΔB_x.

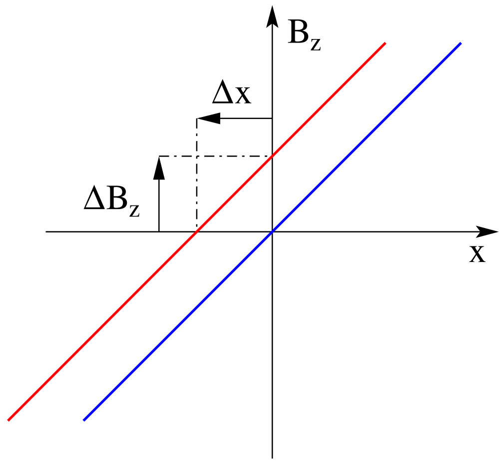


Abbildung 2.3: *Dipolfeldfehler ΔB_z durch einen um Δx transversal verschobenen Quadrupol.*

Ungenauigkeiten bei der Fertigung oder der Vermessung der Magnete ergeben statische Fehler. Dagegen haben mechanische Schwingungen der Magnete auf ihren Trägern typischerweise eine Frequenz von einigen Hertz, während thermisch bedingte Driften im Allgemeinen auf einer Zeitskala von Minuten bis Stunden passieren.

Bei Delta wurden erhebliche Driften festgestellt, die stark mit dem Strahlstrom korreliert sind. Es wurde vermutet, dass dies mit Verschiebungen von Quadrupolen zusammenhängt, die dadurch verursacht werden, dass sich die Vakuumkammer unter der Wärmelast der Synchrotronstrahlung verbiegt [4].

2.5.3 Streufelder

Andere Beschleunigerkomponenten sowie externe Quellen können Streufelder im Bereich des Speicherrings erzeugen. Besonders aufgefallen ist bei Delta der Effekt des gepulsten Transferkanals vom Booster zum Speicherring. Die Dipole des Transferkanals werden mit einen 103 ms langen sinusförmigen Strompuls mit einer Amplitude von etwa

360 A betrieben. Synchron zu diesen Pulsen wurden kurzfristige Störungen auf dem Orbit im Speicherring beobachtet. Vermutlich werden diese Störungen durch die Streufelder der gepulsten Dipole verursacht.

In der Vergangenheit sind auch die Transformatoren der Hochspannungsnetzgeräte der Ionengetterpumpen als 50 Hz-Störquellen aufgefallen. Wahrscheinlich wurden die Streufelder durch das Eisenjoch von benachbarten Quadrupolmagneten eingefangen und zum Elektronenstrahl geführt. Mittlerweile wurde der Einbauort geändert und damit die Störung beseitigt.

Kapitel 3

Orbitkorrektur

Für eine gezielte Veränderung des Orbits ist es notwendig, den Einfluss eines Steuerelements auf den Orbit zu kennen. Die Orbitänderung, die man bei einer bestimmten Änderung des Steuerelements erhält, nennt man die Strahlantwort (oder Orbit-Response) der Änderung. Im Allgemeinen kann man den Orbit jedoch nur an endlich vielen Stellen messen. Hierzu dienen Strahllagemonitore (engl.: beam position monitors, BPMs).

Aus den Messwerten von n BPMs erhält man einen n-dimensionalen Vektor $\vec{x}$ von Ablagen. Oftmals spricht man bei diesem Vektor $\vec{x}$ selbst vom Orbit, man darf aber nicht vergessen, dass der reale Orbit an den meisten Stellen nicht beobachtbar ist. Sind die BPMs ungünstig verteilt, können sich erhebliche unbeobachtbare Orbitstörungen ergeben. Da sich mehrere Störquellen zwischen zwei BPMs befinden können, lässt sich $x(s)$ hier auch nicht ohne weiteres berechnen. Um den Unterschied deutlich zu machen, werden die BPM-Ablagen im weiteren Verlauf als Orbit*vektor* bezeichnet.

3.1 Die Orbit-Response-Matrix

Die Strahlantwort auf eine Änderung der Stellgröße k eines Steuerelements j kann man in Vektorschreibweise ausdrücken als

$$\vec{r}_j = \frac{\partial \vec{x}}{\partial k_j}\,. \tag{3.1}$$

Gibt es mehrere gleichartige Steuerelemente, ist es praktisch, die Responsevektoren $\vec{r}_j$ zu einer Matrix $\mathbf{R}$ zusammen zu fassen. Man nennt $\mathbf{R}$ eine Orbit-Response-Matrix. Meistens meint man, wenn man von der Orbit-Response-Matrix spricht, das Antwortverhalten des Orbitvektors bezüglich der Korrekturmagnete. Das sind Dipolmagnete, welche speziell zur Orbitkorrekur vorgesehen sind. Fasst man die Korrektorstärken zu einem Vektor $\tilde{k}$ zusammen, kann man schreiben

$$\mathbf{R} = \frac{\partial \vec{x}}{\partial \tilde{k}} \qquad \text{oder} \qquad \mathbf{R}_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial k_j}\,. \tag{3.2}$$

Der Vektor $\tilde{k}$ ist hier mit einer Tilde statt mit einem Pfeil versehen, um deutlich zu machen, dass er aus dem Raum der Korrektorstärken und nicht aus dem Raum der BPM-Ablagen stammt. Nimmt man Linearität an[1] , also Konstanz von **R** über dem Variationsbereich von $\tilde{k}$ und $\vec{x}$, gilt

$$\mathbf{R}_{ij} = \frac{\Delta x_i}{\Delta k_j} \qquad \text{bzw.} \qquad \Delta\vec{x} = \mathbf{R}\Delta\tilde{k}\,. \tag{3.3}$$

Da die Korrekturmagnete genauso Winkeländerungen des Orbits verursachen wie Störungen, gilt auch hier Gleichung (2.22). Gibt man die Korrektorstärke direkt als Winkeländerung an, d.h. $\Delta x'_j = \Delta k_j$, liefert der Vergleich mit Gleichung (3.3)

$$\mathbf{R}_{ij} = \frac{\sqrt{\beta_i\beta_j}}{2\sin(\pi Q)}\cos(\psi_i - \psi_j - \pi Q)\,. \tag{3.4}$$

Ein Vergleich dieser theoretischen Response-Matrix mit Messungen kann als ein Maß für die Übereinstimmung zwischen dem theoretischen Optikmodell und den realen Maschinenparametern herangezogen werden. In Kapitel 7.4 werden Messungen der Response-Matrix gezeigt und Vergleiche mit Ergebnissen eines Optikmodells angestellt.

In der Regel reagieren die horizontale und die vertikale Orientierung entkoppelt. Daher kann man sich vereinfachend einer horizontalen Response-Matrix $\mathbf{R_x}$ und einer vertikalen Matrix $\mathbf{R_z}$ bedienen. Die Anzahl der Korrektoren oder der Strahllagemonitore für die beiden Orientierungen und damit die Größe der beiden Response-Matrizen kann verschieden sein.

3.2 Korrekturverfahren

Die Orbitkorrektur beschäftigt sich mit dem Problem, aus $\Delta\vec{x} = \mathbf{R}\Delta\tilde{k}$ die notwendigen Änderungen der Korrektorstärken $\Delta\tilde{k}$ so zu bestimmen, dass eine gewünschte Orbitänderung $\Delta\vec{x}$ erreicht wird. Häufig gilt $\Delta\vec{x} = -\vec{x}$, das heißt man möchte den idealen Orbitvektor $\vec{x} = \vec{0}$ erreichen. Manchmal korrigiert man aber auch auf einen Referenzvektor $\vec{x}_r \neq \vec{0}$, so dass $\Delta\vec{x} = \vec{x}_r - \vec{x}$.

Da **R** nicht quadratisch und somit nicht invertierbar zu sein braucht, kann man die erforderliche Korrektur nicht einfach durch $\Delta\tilde{k} = \mathbf{R}^{-1}\Delta\vec{x}$ berechnen. Hat man weniger Korrektoren als BPMs, ist das Problem im Allgemeinen überhaupt nicht exakt lösbar.

Stattdessen versucht man, den Restfehler $\varepsilon \equiv ||\mathbf{R}\Delta\tilde{k} - \Delta\vec{x}||$ bezüglich $\Delta\tilde{k}$ zu minimieren. Meistens benutzt man die Euklidische Norm:

$$\varepsilon = \sqrt{(\mathbf{R}\Delta\tilde{k} - \Delta\vec{x})^2} \rightarrow min \tag{3.5}$$

$$\Rightarrow \quad \varepsilon^2 = (\mathbf{R}\Delta\tilde{k} - \Delta\vec{x})^2 \rightarrow min \tag{3.6}$$

$$\Rightarrow \quad 0 = \frac{\partial\varepsilon^2}{\partial\Delta\tilde{k}} = 2\mathbf{R}^\mathrm{T}(\mathbf{R}\Delta\tilde{k} - \Delta\vec{x}) \tag{3.7}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta\tilde{k} = (\mathbf{R}^\mathrm{T}\mathbf{R})^{-1}\mathbf{R}^\mathrm{T}\Delta\vec{x} \tag{3.8}$$

[1]Dies ist in der Praxis mit hinreichender Genauigkeit erfüllt, siehe Messungen in Kapitel 7.4

Somit läuft die Orbitkorrektur auf das Problem hinaus, die Matrix $\mathbf{R}^T\mathbf{R}$ zu invertieren. Bei einem guten Optikmodell kann man $\mathbf{R}$ mittels Gleichung (3.4) aus der theoretischen Optik gewinnen. Jedoch ist auch eine spaltenweise Messung von $\mathbf{R}$ nach Gleichung (3.1) leicht durchführbar.

Der Vergleich mit den Theoriewerten hat gezeigt, dass es Abweichungen gibt, die bislang noch nicht geklärt sind. Die Implementierung der Korrekurverfahren wurde daher ausschließlich mit gemessenen Responsematrizen durchgeführt.

Man kann generell zwischen globalen und lokalen Korrekturverfahren unterscheiden. Lokale Verfahren versuchen, den Orbit an einer oder mehreren einzelnen Stellen zu korrigieren. Globale Verfahren hingegen minimieren den quadratischen Mittelwert der Abweichungen. Sie benutzen dazu meist relativ wenige Korrektoren.

Globale Verfahren sind stabiler gegen Auslesefehler einzelner BPMs als lokale Verfahren, können aber den Orbit nicht unbedingt an allen BPMs auf den Sollwert bringen. Allerdings ist ein in allen BPMs korrigierter Orbitvektor keine Garantie dafür, dass der Orbit zwischen den BPMs ebenfalls mit dem Sollorbit übereinstimmt.

Man kann davon ausgehen, dass die meisten Störungen an einigen wenigen Stellen verursacht werden und den Orbit global stören. Daher sind vor allem die Korrekturverfahren sinnvoll, die mit wenigen Korrektoren in der Nähe der Störungen den Orbit global korrigieren.

3.2.1 Effektivster Korrektor

Der Algorithmus des effektivsten Korrektors ist ein iteratives globales Korrekturverfahren. Er beruht darauf, schrittweise jeweils nur ein k_j zu verändern. Man sucht dazu denjenigen Korrektor j, der den Orbitvektor am besten korrigiert.

Um diesen Korrektor zu finden, minimiert man den Restfehler $\varepsilon_j \equiv ||\vec{r}_j \Delta k_j - \Delta\vec{x}||$ bezüglich einer Korrektur Δk_j.

$$
\begin{aligned}
0 &= \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \Delta k_j} && (3.9)\\
&= \frac{\partial}{\partial \Delta k_j}(\vec{r}_j \Delta k_j - \Delta\vec{x})^2 && (3.10)\\
&= 2\vec{r}_j \cdot (\vec{r}_j \Delta k_j - \Delta\vec{x}) && (3.11)\\
\Rightarrow \Delta k_j &= \frac{\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x}}{\vec{r}_j \cdot \vec{r}_j} && (3.12)
\end{aligned}
$$

Von allen Δk_j sucht man dasjenige aus, für das der Fehler ε_j (somit auch ε_j^2) minimal ist.

Setzt man Gleichung (3.12) in Gleichung (3.6) ein, erhält man

$$\begin{aligned}
\varepsilon_j^2 &= \left(\vec{r}_j \frac{\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x}}{\vec{r}_j \cdot \vec{r}_j} - \Delta\vec{x}\right)^2 & (3.13)\\
&= \frac{(\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x})^2}{\vec{r}_j \cdot \vec{r}_j} - 2\frac{(\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x})^2}{\vec{r}_j \cdot \vec{r}_j} + \Delta\vec{x} \cdot \Delta\vec{x} & (3.14)\\
&= (\Delta\vec{x})^2 - \frac{(\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x})^2}{\vec{r}_j \cdot \vec{r}_j} \to min & (3.15)\\
\Rightarrow & \frac{(\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x})^2}{\vec{r}_j \cdot \vec{r}_j} \equiv E_j \to max. & (3.16)
\end{aligned}$$

Der Ausdruck E_j ist ein Maß für die Effektivität des Korrektors j. Der Korrekturalgorithmus wählt zuerst den Korrektor mit der größten Effektivität E_j und berechnet die nötige Stärkenänderung Δk_j nach Gleichung (3.12). Jetzt wird der Korrektor j verändert und der Orbitvektor neu gemessen. Daraufhin startet der Algorithmus neu.

Eine Erweiterung dazu ist es, den Korrekturalgorithmus mehrere Durchläufe machen zu lassen, in denen jeweils der Effekt des Korrektors modelliert wird, um einen neuen voraussichtlichen Orbitvektor $\Delta\vec{x}$ errechnen. Den Orbitvektor in der Iteration $t+1$ erhält man aus dem vorherigen Orbitvektor nach

$$\Delta\vec{x}(t+1) = \Delta\vec{x}(t) - \Delta k_j \vec{r}_j\,. \tag{3.17}$$

Zum Schluss ändert man alle ausgewählten Korrektoren gleichzeitig und misst erst dann den Orbitvektor neu. Der Vorteil dieser Erweiterung liegt darin, dass die Modellierung bei langsamen Korrektoren und BPMs schneller geht als die reale Änderung eines Korrektors und die erneute Messung des Orbitvektors.

Da aber das reale Verhalten des Orbits aufgrund von nichtlinearen Effekten und Ungenauigkeiten bei der Messung der Response-Matrix vom erwarteten Verhalten abweichen kann, sollte man die Anzahl der Iterationen nicht allzu groß werden lassen. Mehr als 5 Iterationen haben sich nicht bewährt.

Aus demselben Grund wendet man häufig nur verringerte Werte $\alpha{\cdot}\Delta k_j$ an – typischerweise liegt α zwischen 0.5 und 0.9. Man verhindert so ein Überschwingen erhält eine höhere Stabilität auf Kosten einer langsameren Regelung.

Der Vorteil dieser iterativen Methode ist es, dass man ohne eine Matrixinvertierung auskommt. Die Methode ist global, da jeder Schritt versucht, die mittlere quadratische Ablage des gesamten Orbitvektors zu minimieren. Man kann bereits mit relativ wenigen Korrektoren gute Ergebnisse erzielen. Es wird jedoch noch nicht berücksichtigt, dass die realen Korrektoren in ihrer Stärke beschränkt sind, wodurch es eventuell nicht möglich ist, die effektivste Korrektur auszuführen. Abhilfe können die im Folgenden diskutierten Verfahren schaffen.

3.2.2 Effizientester Korrektor

Es kommt vor, dass mehrere Korrektoren ähnlich effektiv sind, wenn der Phasenvorschub zwischen ihnen ungefähr ein Vielfaches von π ist. Dabei können jedoch die erforderlichen

Änderungen der Korrektorstärken Δk_j sehr verschieden sein. Diesen Unterschied kann man am unterschiedlichen Betrag der zugehörigen Responsevektoren $|\vec{r}_j|$ erkennen. Die Ursache liegt nach Gleichung (2.22) an den verschieden großen Werten der Betafunktion an den Positionen der einzelnen Korrektoren.

Möchte man große Änderungen der Korrektorstärken vermeiden, kann es vorteilhaft sein, statt des effektivsten Korrektors denjenigen zu wählen, der den Orbitvektor mit der geringsten Änderung gut korrigiert. Das ist derjenige, dessen Responsevektor $\vec{r}_j$ der gewünschten Änderung des Orbitvektors $\Delta\vec{x}$ ohne Berücksichtigung des Vorzeichens am ähnlichsten ist. Dieser soll der effizienteste Korrektor heißen und wird durch $|\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x}| \rightarrow max$ bzw. $(\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x})^2 \rightarrow max$ bestimmt. Der Ausdruck

$$E'_j \equiv (\vec{r}_j \cdot \Delta\vec{x})^2 \tag{3.18}$$

ist ein Maß für die Effizienz des Korrektors j. Man sieht, dass sich die Effizienz E'_j von der Effektivität E_j aus Gleichung (3.16) gerade um den Faktor $|\vec{r}_j|^2$ unterscheidet.

Diese Methode liefert eine gute, aber nicht unbedingt die bestmögliche Korrektur. Dafür bleiben die Änderungen der Korrektorstärken kleiner. Der Korrekturalgorithmus ist ansonsten gleich dem für den effektivsten Korrektor.

3.2.3 Korrektur mit gewichteten Korrektoren

Die Korrektur nach den Methoden des effektivsten oder effizientesten Korrektors kann dazu führen, dass einige Korrektoren sehr große Werte erhalten. Das ist ein Problem, wenn die Maximalstärke des Korrektors erreicht wird. Man kann daher versuchen, eine Einstellung zu finden, die einen Kompromiss aus minimaler Orbitablage und minimalen Korrektorstärken darstellt.

Um dies zu erreichen, werden die Auswahlkriterien für den effektivsten oder effizientesten Korrektor mit einem Qualitätsfaktor q gewichtet, der Änderungen, die zu großen Korrektorstärken führen, unterdrückt. Ein solcher Faktor ist beispielsweise

$$q_j = \left[1 - \left(\frac{k_j + \Delta k_j}{k_{max}}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{k_j}{k_{max}}\right)^2\right]. \tag{3.19}$$

Der erste Term unterdrückt alle Korrektoren, deren neue Stärke in der Nähe des Maximalwertes liegen würden. Der zweite Term bevorzugt Korrektoren, die bisher besonders hohe Werte hatten, so dass diese eher verändert werden. Abbildung 3.1 veranschaulicht den Qualitätsfaktor in Abhängigkeit von k und Δk.

3.2.4 Korrektur mit gewichteten BPMs

Ist die Orbitqualität an einigen Stellen besonders wichtig (z.B. in den Insertion Devices) bietet es sich an, den dortigen BPMs mehr Beachtung zu schenken als den übrigen. Dies

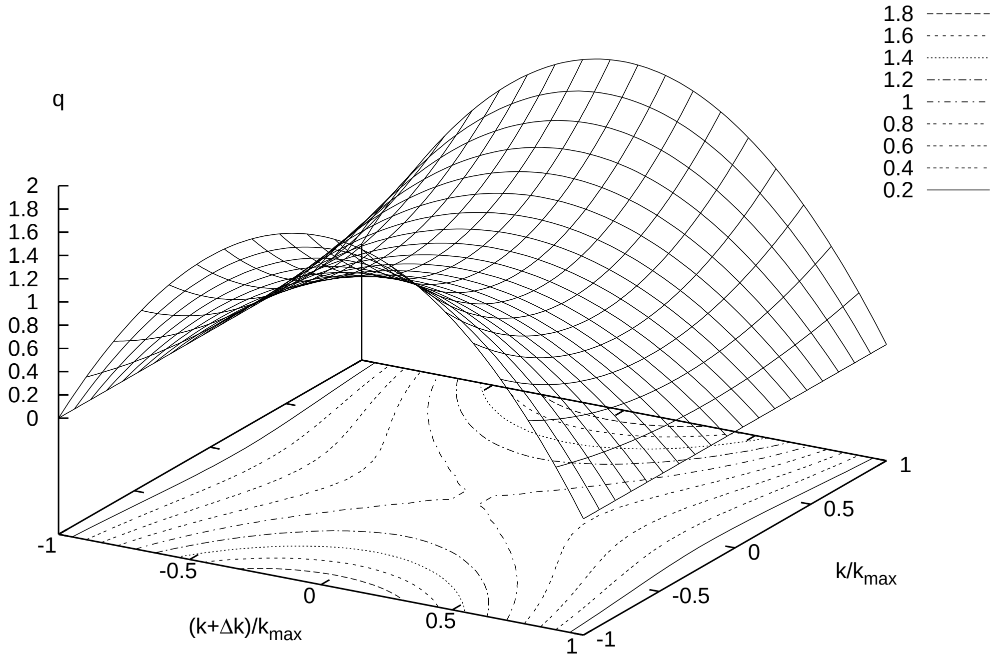


Abbildung 3.1: *Der Qualitätsfaktor q in Abhängigkeit von der bisherigen (k) und neuen $(k+\Delta k)$ Korrektorstärke. Für $|k+\Delta k| \rightarrow k_{max}$ geht der Qualitätsfaktor gegen 0, so dass diese Korrekturen unterdrückt werden. Ansonsten werden Korrektoren bevorzugt, die bisher große Stärken $|k|$ haben.*

kann man durch eine Diagonalmatrix $\mathbf{W}$ von Gewichtungsfaktoren erreichen, mittels derer man den Restfehler ε durch ein gewichtetes Skalarprodukt berechnet:

$$\varepsilon^2 = (\vec{r}_j \Delta k_j - \Delta\vec{x})^{\mathrm{T}} \mathbf{W} (\vec{r} \Delta k_j - \Delta\vec{x}) \tag{3.20}$$

Die Minimierung von ε^2 bezüglich Δk_j ergibt damit analog zu (3.9):

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \Delta k_j} && (3.21)\\ &= \frac{\partial}{\partial \Delta k_j} (\vec{r}_j \Delta k_j - \Delta\vec{x})^{\mathrm{T}} \mathbf{W} (\vec{r}_j \Delta k_j - \Delta\vec{x}) && (3.22)\\ &= \vec{r}_j^{\mathrm{T}} \mathbf{W} (\vec{r}_j \Delta k_j - \Delta\vec{x}) + (\vec{r}_j \Delta k_j - \Delta\vec{x})^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \vec{r}_j && (3.23)\\ \Rightarrow \Delta k_j &= \frac{\vec{r}_j^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \Delta\vec{x}}{\vec{r}_j^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \vec{r}_j} && (3.24) \end{aligned}$$

Im Vergleich von Gleichung (3.24) mit Gleichung (3.12) sieht man, dass alle Skalarprodukte $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{a}^{\mathrm{T}} \vec{b}$ durch das gewichtete Produkt $\vec{a}^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \vec{b}$ ersetzt werden. Man kann zeigen, dass dies auch für die Ausdrücke für die Effektivität und die Effizienz zutrifft:

$$E_{j,gew} \equiv \frac{(\vec{r}_j^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \Delta\vec{x})^2}{\vec{r}_j^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \vec{r}_j} \qquad \text{bzw.} \qquad E'_{j,gew} \equiv (\vec{r}_j^{\mathrm{T}} \mathbf{W} \Delta\vec{x})^2 \,. \tag{3.25}$$

3.2.5 Lokale Orbitbeulen

Die bisher diskutierten Korrekturmethoden verändern jeweils nur einzelne Korrektoren. Diese Änderung wirkt sich stets auf den gesamten Orbit aus. Durch eine Kombination mehrerer Korrektoren ist es aber möglich, Orbitänderungen lokal zu halten. So kann beispielsweise der Orbit an einem Quellpunkt der Synchrotronstrahlung den Nutzerwünschen entsprechend angepasst werden.

Lokale Orbitbeulen bestehen aus drei oder vier nah benachbarten Korrektoren, die so kombiniert werden, dass sich der Orbit nur zwischen dem erstem und dem letzten Korrektor ändert. Man kann sich leicht überlegen, dass eine solche Kombination stets möglich ist: Der erste Korrektor lenkt den Strahl aus seiner Bahn, so dass er Betatronschwingungen um den bisherigen Orbit ausführt. Der zweite Korrektor lenkt den Strahl so ab, dass er genau am Ort des dritten Korrektors den ungestörten Orbit kreuzt. Der dritte Korrektor schließlich ändert den Winkel des Strahls derart, dass er wieder dem ursprünglichen Orbit folgt.

Wenn eine horizontale Orbitbeule einen Dipol einschließt, müsste sich allerdings auch die Länge des Orbits nach Gleichung (2.9) ändern. Dazu ist es notwendig, die Hochfrequenz anzupassen. Unterlässt man dies, so verschiebt sich der Elektronenstrahl auf eine Dispersionsbahn und man kann die Orbitänderung nicht lokal halten. Es kommt dann zu einer Veränderung der Strahlenergie. In vertikaler Orientierung tritt dieser Effekt aufgrund der fehlenden Dispersion nicht auf.

Solange der Orbit linear auf Änderungen der Korrektorstärken reagiert, **R** also konstant ist, gilt das Superpositionsprinzip. Das heißt, man kann eine frei skalierbare Orbitbeule aus den Responsevektoren dreier Korrektoren und eventuell der Dispersion berechnen. Die Skalierung erfolgt über eine gewünschte Ablageänderung an einem Rerefenzpunkt innerhalb der Beule.

Bei Benutzung von vier Korrektoren für eine lokale Orbitbeule erhält man einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Man kann damit entweder die Ablageänderung an zwei Referenzpunkten gleichzeitig einstellen oder an einem Referenzpunkt zusätzlich zur Ablageänderung auch die Winkeländerung vorgeben. Wenn man die Orbit-Response-Matrix benutzt, um Beulen zu berechnen, ist man allerdings auf Ablagen in BPMs Referenz beschränkt. Ablagen an anderen Stellen oder Winkelinformationen lassen sich nur mit Hilfe eines Optikmodells berechnen.

Man kann lokale Orbitbeulen zur Orbitkorrektur benutzen, indem man hinreichend viele überlappende Beulen über den Umfang des Speicherrings verteilt. Der Orbitvektor kann dann zwar in den BPMs sehr genau korrigiert werden, es können aber an anderen Stellen Ablagen entstehen, die vom BPM-System nicht erkannt werden. Außerdem ist dieses Verfahren sehr anfällig gegenüber Funktionsstörungen und Auslesefehlern einzelner BPMs. Für eine automatische globale Orbitstabilisierung sind Beulen daher weniger geeignet, wohl aber zur Erzeugung definierter lokaler Orbitänderungen.

In den folgenden Abschnitten werden die Formeln zur Berechnung von lokalen Orbitbeulen mit drei Korrektoren (Dreierbeulen) und mit vier Korrektoren (Viererbeulen) hergeleitet.

Dreierbeulen

Es sollen drei Korrektoren A, B und C benutzt werden, um eine lokale Orbitbeule zu erzeugen. Die Bedingung für die Abgeschlossenheit der Beule ist, dass die Superposition der Responsevektoren außerhalb der lokalen Beule Null ergibt. Es seien $\vec{A}$, $\vec{B}$, $\vec{C}$ die Responsevektoren $\vec{r}_A$, $\vec{r}_B$, $\vec{r}_C$ ohne die BPMs im Inneren der Beule[2]. Dann soll gelten

$$a\vec{A} + b\vec{B} + c\vec{C} = \vec{0}\,. \tag{3.26}$$

Aufgrund von Messfehlern der Responsevektoren und der Dispersion ist dieses Gleichungssystem im Allgemeinen nicht exakt lösbar. Stattdessen verlangt man die beste Näherung.

$$(a\vec{A} + b\vec{B} + c\vec{C})^2 \to min \tag{3.27}$$

Behält man einen Parameter, zum Beispiel a, zur Skalierung der Beule frei, erhält man b und c aus

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial b}(a\vec{A} + b\vec{B} + c\vec{C})^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c}(a\vec{A} + b\vec{B} + c\vec{C})^2 = 0 \end{cases} \tag{3.28}$$

$$\begin{cases} a\vec{A}\cdot\vec{B} + b\vec{B}^2 + c\vec{C}\cdot\vec{B} = 0 \\ a\vec{A}\cdot\vec{C} + b\vec{B}\cdot\vec{C} + c\vec{C}^2 = 0 \end{cases} \tag{3.29}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} b = \frac{(\vec{A}\cdot\vec{B})\vec{C}^2 - (\vec{A}\cdot\vec{C})(\vec{B}\cdot\vec{C})}{(\vec{B}\cdot\vec{C})^2 - \vec{B}^2\vec{C}^2}\, a \equiv F_{ab}\, a \\ \\ c = \frac{(\vec{A}\cdot\vec{C})\vec{B}^2 - (\vec{A}\cdot\vec{B})(\vec{B}\cdot\vec{C})}{(\vec{B}\cdot\vec{C})^2 - \vec{B}^2\vec{C}^2}\, a \equiv F_{ac}\, a\,. \end{cases} \tag{3.30}$$

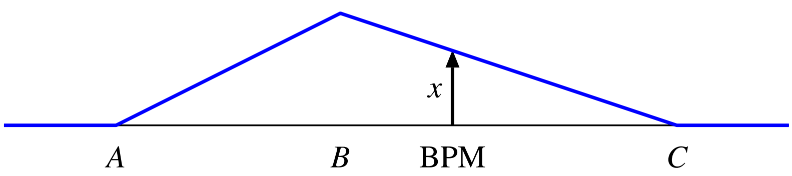


Abbildung 3.2: *Schema einer Orbitbeule mit drei Korrektoren A, B und C sowie einem BPM als Referenz.*

An einem BPM im Inneren der Beule soll eine Ablageänderung x erzeugt werden. Seien r_A, r_B, r_C die Elemente der Responsevektoren an der Stelle dieses BPMs. Dann ergibt sich für die Skalierung der Beule

$$a\,r_A + b\,r_B + c\,r_C = x \tag{3.31}$$

$$\Leftrightarrow \quad a = \frac{x}{r_A + F_{ab}\,r_B + F_{ac}\,r_C}\,. \tag{3.32}$$

[2]Dazu kann man in den folgenden Rechnungen einfach diejenigen Komponenten der Responsevektoren auf 0 setzen, die zu BPMs im Beuleninneren gehören.

Viererbeulen

Will man nicht nur einen Parameter einstellen, sondern zwei gleichzeitig, zum Beispiel eine Ablage und einen Winkel oder zwei Ablagen, benötigt man einen zusätzlichen Freiheitsgrad. Dazu erzeugt man eine lokale Orbitbeule mit Hilfe von vier Korrektoren A, B, C und D. Analog zur Dreierbeule verlangt man minimale Änderungen des Orbitvektors außerhalb der Beule.

$$(a\vec{A}+b\vec{B}+c\vec{C}+d\vec{D})^2 \rightarrow min \tag{3.33}$$

Zwei Parameter, beispielsweise a und d, werden benutzt, um die Beule einzustellen. Dann lautet die Bedingung für b und c

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial b}(a\vec{A}+b\vec{B}+c\vec{C}+d\vec{D})^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c}(a\vec{A}+b\vec{B}+c\vec{C}+d\vec{D})^2 = 0 \end{cases} \tag{3.34}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a\vec{A}\cdot\vec{B}+b\vec{B}^2+c\vec{C}\cdot\vec{B}+d\vec{D}\cdot\vec{B} = 0 \\ a\vec{A}\cdot\vec{C}+b\vec{B}\cdot\vec{C}+c\vec{C}^2+d\vec{D}\cdot\vec{C} = 0 \end{cases} \tag{3.35}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} b = \frac{(\vec{A}\cdot\vec{B})\vec{C}^2-(\vec{A}\cdot\vec{C})(\vec{C}\cdot\vec{B})}{(\vec{B}\cdot\vec{C})^2-\vec{B}^2\vec{C}^2}\,a+\frac{(\vec{D}\cdot\vec{B})\vec{C}^2-(\vec{D}\cdot\vec{C})(\vec{C}\cdot\vec{B})}{(\vec{B}\cdot\vec{C})^2-\vec{B}^2\vec{C}^2}\,d \equiv F_{ab}\,a+F_{db}\,d \\ \\ c = \frac{(\vec{A}\cdot\vec{C})\vec{B}^2-(\vec{A}\cdot\vec{B})(\vec{B}\cdot\vec{C})}{(\vec{B}\cdot\vec{C})^2-\vec{B}^2\vec{C}^2}\,a+\frac{(\vec{D}\cdot\vec{C})\vec{B}^2-(\vec{D}\cdot\vec{B})(\vec{B}\cdot\vec{C})}{(\vec{B}\cdot\vec{C})^2-\vec{B}^2\vec{C}^2}\,d \equiv F_{ac}\,a+F_{dc}\,d\,. \end{cases} \tag{3.36}$$

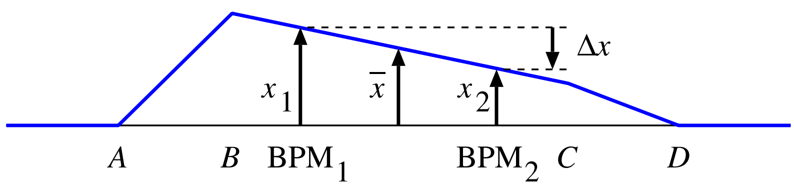


Abbildung 3.3: *Schema einer Orbitbeule mit vier Korrektoren A, B, C und D sowie zwei Referenzpunkten BPM_1und BPM_2.*

Die Viererbeule wird über zwei Ablageänderungen x_1 und x_2 an zwei BPMs eingestellt. Seien r_{1A}, r_{1B}, r_{1C} und r_{1D} die Elemente der Responsevektoren an der Stelle des ersten BPMs und entsprechend r_{2A}, r_{2B}, r_{2C} und r_{2D} an der Stelle des zweiten BPMs, so erhält man die Bedingungen

$$\begin{cases} a\,r_{1A}+b\,r_{1B}+c\,r_{1C}+d\,r_{1D} = x_1 \\ a\,r_{2A}+b\,r_{2B}+c\,r_{2C}+d\,r_{2D} = x_2 \end{cases} \tag{3.37}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a(\underbrace{r_{1A}+F_{ab}\,r_{1B}+F_{ac}\,r_{1C}}_{\equiv F_{1a}})+d(\underbrace{F_{db}\,r_{1B}+F_{dc}\,r_{1C}+r_{1D}}_{\equiv F_{1d}}) = x_1 \\ a(\underbrace{r_{2A}+F_{ab}\,r_{2B}+F_{ac}\,r_{2C}}_{\equiv F_{2a}})+d(\underbrace{F_{db}\,r_{2B}+F_{dc}\,r_{2C}+r_{2D}}_{\equiv F_{2d}}) = x_2 \end{cases} \tag{3.38}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} a = \frac{F_{2d}\,x_1-F_{1d}\,x_2}{F_{1a}\,F_{2d}-F_{2a}\,F_{1d}} \\ \\ d = \frac{F_{1a}\,x_2-F_{2a}\,x_1}{F_{1a}\,F_{2d}-F_{2a}\,F_{1d}}\,. \end{cases} \tag{3.39}$$

Eine andere Einstellmöglichkeit ist die Definition einer „Beulenablage“ und eines „Beulenwinkels“ über die durchschnittliche Ablage $\bar{x} \equiv (x_1 + x_2)/2$ und die Ablagedifferenz $\Delta x \equiv x_2 - x_1$. Sind $\bar{x}$ und Δx gegeben, lassen sich daraus $x_1 = \bar{x} - \Delta x/2$ und $x_2 = \bar{x} + \Delta x/2$ rekonstruieren und damit a, b, c und d wie zuvor berechnen.

3.2.6 Lokales Orbit-Feedback

Mitunter treten während des Betriebs des Speicherrings Orbitverschiebungen auf, deren Ursache bekannterweise in einem eng begrenzten Bereich des Rings zu finden ist. Man kann nun versuchen, die Orbitstörungen lokal zu halten, indem man je einen Korrektor vor und nach der Störstelle benutzt. Diese Korrektoren (A und B) müssen so eingestellt werden, dass sie zusammen mit der unbekannten Störung eine abgeschlossene Dreierbeule bilden. Außerhalb dieses lokalen Bereiches bleibt der Orbit dann unverändert.

Seien $\vec{A}$ und $\vec{B}$ die Responsevektoren der Korrektoren und $\vec{X}$ die gemessene Änderung des Orbitvektors jeweils außerhalb des lokalen Bereichs[3], so soll gelten

$$(a\vec{A} + b\vec{B} + \vec{X})^2 \rightarrow min\,. \tag{3.40}$$

Damit lautet die Bedingung für a und b

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial a}(a\vec{A} + b\vec{B} + \vec{X})^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b}(a\vec{A} + b\vec{B} + \vec{X})^2 = 0 \end{array} \right. \tag{3.41}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 2(a\vec{A}^2 + b\vec{A}\cdot\vec{B} + \vec{A}\cdot\vec{X}) = 0 \\ 2(a\vec{A}\cdot\vec{B} + b\vec{B}^2 + \vec{B}\cdot\vec{X}) = 0 \end{array} \right. \tag{3.42}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} a = \frac{(\vec{A}\cdot\vec{B})\vec{B} - \vec{B}^2\vec{A}}{(\vec{A}\cdot\vec{B})^2 - \vec{A}^2\vec{B}^2} \cdot \vec{X} \equiv \vec{V}_a \cdot \vec{X} \\ \\ b = \frac{(\vec{A}\cdot\vec{B})\vec{A} - \vec{A}^2\vec{B}}{(\vec{A}\cdot\vec{B})^2 - \vec{A}^2\vec{B}^2} \cdot \vec{X} \equiv \vec{V}_b \cdot \vec{X}\,. \end{array} \right. \tag{3.43}$$

Der Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass sie nur dann zufriedenstellend funktioniert, wenn nur eine einzelne Störquelle die Orbitänderungen dominiert. Bei vielen über den Speicherring verteilten Störquellen sind die globalen Korrekturverfahren besser geeignet.

3.2.7 Das SVD-Verfahren

Das SVD-Verfahren (**S**ingular **V**alue **D**ecomposition) ist ein numerischer Algorithmus zur Invertierung von Matrizen. Es nutzt die Tatsache, dass sich jede reelle Matrix $\mathbf{A}$ in ein Produkt aus drei Matrizen zerlegen lässt $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}$, wobei $\mathbf{U}$ und $\mathbf{V}$ orthogonal sind und $\mathbf{S}$ eine Diagonalmatrix reeller Zahlen $s_1 \ldots s_n$ ist.

[3] Die Vektorkomponenten, die zu BPMs in inneren des lokalen Bereichs gehören, werden wieder entfernt bzw. auf 0 gesetzt.

Ist **A** quadratisch und nicht singulär, ist die inverse Matrix gegeben durch

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{V}\mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}^{\mathrm{T}}. \tag{3.44}$$

Dabei ist $\mathbf{S}^{-1}$ die Diagonalmatrix aus den Werten $1/s_1 \dots 1/s_n$. Ist **A** singulär, so ist mindestens einer der Werte $s_i = 0$. Aber selbst in diesem Fall erhält man eine sinnvolle „Inverse“ , wenn man $\mathbf{S}^{-1}$durch eine Matrix $\mathbf{S}^{\#}$ ersetzt, in der alle $1/s_i$ durch 0 ersetzt sind, wenn $s_i = 0$. Auf diese Art kann man selbst von nicht quadratischen Matrizen die „Inverse“ $\mathbf{A}^{\#} = \mathbf{V}\mathbf{S}^{\#}\mathbf{U}^{\mathrm{T}}$ bilden.

Ist ein lineares Gleichungssystem reeller Zahlen $\mathbf{A}x = c$ gegeben, so ergibt die SVD-Lösung $x = \mathbf{A}^{\#}c$

1. die exakte Lösung, wenn das Gleichungssystem eindeutig bestimmt ist.

2. die beste Näherung, das heißt das x mit $|\mathbf{A}x - c| \rightarrow min$, wenn das Gleichungssystem überbestimmt ist.

3. die Lösung mit dem kleinsten Betrag $|x| \rightarrow min$, wenn das Gleichungssystem unterbestimmt ist.

In der Praxis ersetzt man in $\mathbf{S}^{\#}$ bereits dann einen Wert $1/s_i$ durch 0, wenn s_i kleiner als eine Schwelle δ ist. Man verhindert dadurch numerische Instabilitäten, welche durch die begrenzte Messgenauigkeit der Matrix **A** entstehen können.

Folgende Überlegung rechtfertigt diesen Umgang mit Singularitäten und „fast-Singularitäten“: Gibt es einen Vektor x_0, der im (fast-)Nullraum der Matrix liegt, d.h. $\mathbf{A}x_0 \approx 0$, so ist mit jeder Lösung x auch jedes $x + ax_0$ (fast) eine Lösung. Das SVD-Verfahren liefert in diesem Fall die (ungefähre) Lösung mit dem kleinsten Betrag. Den besten Wert für die Schwelle δ muss man empirisch ermitteln.

Die Berechnung der Zerlegung sowie eine geeignete Implementierung ist in Numerical Recipes [5] zu finden.

Anwendung in der Orbitkorrektur

Das Orbitkorrekturproblem, $\Delta\tilde{k}$ aus $\mathbf{R}\Delta\tilde{k} = \Delta\vec{x}$ zu bestimmen, lässt sich mit dem SVD-Verfahren durch $\Delta\tilde{k} = \mathbf{R}^{\#}\Delta\vec{x}$ lösen. Bei Delta gibt es sowohl für die horizontale wie auch für die vertikale Orientierung mehr BPMs als Korrektoren. Somit handelt es sich um ein überbestimmtes Gleichungssystem. Die SVD-Lösung liefert also die beste Näherung, das heißt die bestmögliche Korrektur.

Ist der Wert der Schwelle δ zu klein gewählt, kommt es zu numerischen Instabilitäten, die sich dadurch äußern können, dass für einige Korrektoren extrem große Änderungen errechnet werden. Diese können die Limitierung der Geräte überschreiten. Bei einer zu großen Schwelle ist die Korrektur nicht optimal, das heißt der Orbit behält einen Restfehler.

Der Korrekturalgorithmus muss zu Anfang einmal die „inverse“ Responsematrix $\mathbf{R}^{\#}$ berechnen. In jedem Korrekturschritt erhält man alle notwendigen Korrektorstärken $\Delta\tilde{k}$ gleichzeitig durch eine Matrixmultiplikation. Auch hier kann man zur Steigerung der Stabilität zunächst einen herunterskalierten Wert $\alpha\Delta\tilde{k}$ mit $0 < \alpha < 1$ einstellen, so dass sich der Orbit iterativ dem Sollorbit annähert.

Wenn jedoch Korrektoren oder BPMs von der Benutzung ausgenommen werden sollen, muss $\mathbf{R}^{\#}$ neu berechnet werden. Dazu werden vor der Invertierung in $\mathbf{R}$ die entsprechenden Spalten (für Korrektoren) bzw. Zeilen (für BPMs) auf 0 gesetzt. Der Schwellwert δ muss dabei eventuell neu angepasst werden.

Im Gegensatz zu den bisher genannten Verfahren werden alle Korrektoren gemeinsam verändert. Obwohl das SVD-Verfahren sämtliche BPM-Auslesen gleichzeitig zu vermindern sucht, ist es jedoch kein globales Verfahren. Im Gegensatz zu diesen wird nicht der durchschnittliche Orbitfehler minimiert, sondern das SVD-Verfahren korrigiert jeden BPM-Wert einzeln. Das entspricht einer geeigneten Superposition von Orbitbeulen. Daher hat das Verfahren auch dieselben Probleme wie die Korrektur mit lokalen Beulen, insbesondere die Tendenz zu einzelnen großen Korrektorstärken und die Anfälligkeit gegenüber BPM-Fehlauslesen.

Kapitel 4

Geräte zur Orbitkorrektur

Die im Kapitel 3 behandelten Verfahren benötigen Zugriff auf diverse Geräte. Für die Umsetzung der Algorithmen ist es wichtig, verschiedene Geräteparameter wie Genauigkeit und Geschwindigkeit zu kennen. Es folgt eine Übersicht über den Aufbau und die Eigenschaften der Geräte sowie ihre Anbindung an das Kontrollsystem.

4.1 Die Strahllagemonitore

Der Speicherring Delta besitzt 43 Strahllagemonitore (BPMs). Diese werden mit bpm01 bis bpm44 bezeichnet. Infolge des Einbaus des supraleitenden Wigglers ist der bpm33 aus technischen Gründen weggefallen. Somit kann an 43 Orten die Orbitablage in x- und z-Orientierung ermittelt werden.

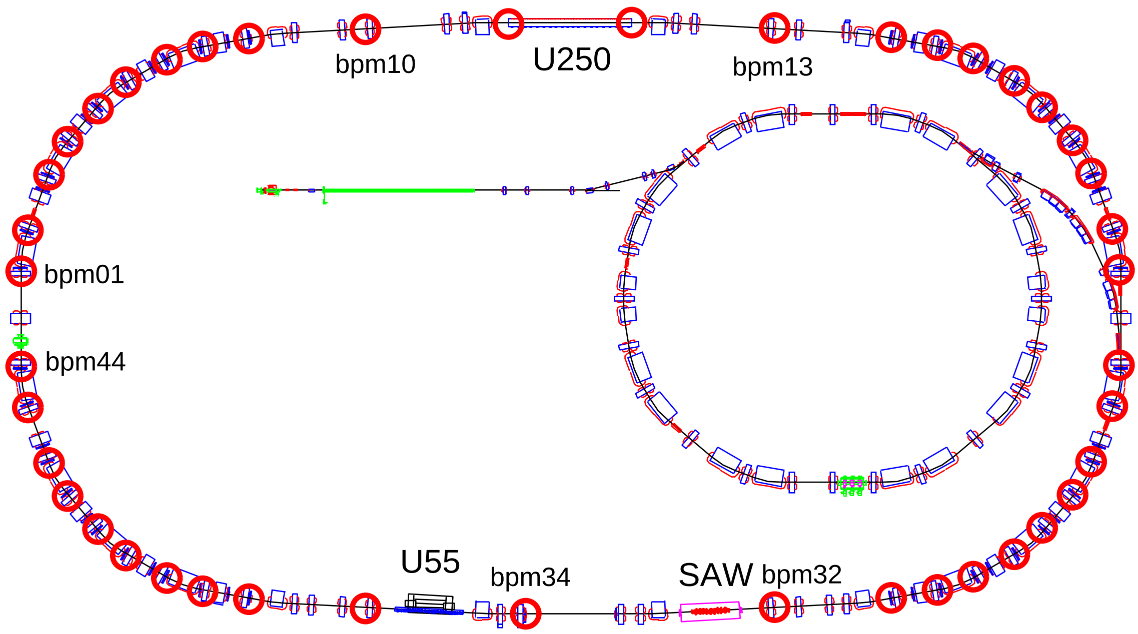


Abbildung 4.1: *Positionen der 43 BPMs im Speicherring Delta.*

Die Verteilung der BPMs ist derart, dass sich in den Bögen des Speicherrings jeweils am Anfang und am Ende eines jeden Quadrupoltripletts ein BPM befindet. Weiterhin sind vier BPMs im Bereich der Nordgeraden, zwei davon unmittelbar vor und nach dem U250-Undulator, und drei im Bereich der Südgeraden eingebaut (siehe Abbildung 4.1). Diese Verteilung hat Folgen für die Aussagekraft der BPM-Messungen über den realen Orbit (siehe auch Abbildung 2.1):

1. Alle BPMs in den Bögen liegen in der Nähe von horizontal defokussierenden Quadrupolen. Hier ist die horizontale Betafunktion durchschnittlich um den Faktor vier kleiner als in den horizontal fokussierenden Quadrupolen in der Mitte der Tripletts. Da die Amplitude der Betatronschwingung mit der Wurzel der Betafunktion skaliert, muss man annehmen, dass der horizontale Orbit dort durchschnittlich um den Faktor 2 größere Ablagen hat, als die BPM-Auslesen vermuten lassen.

2. Die Maxima der Dispersion liegen ebenfalls in den horizontal fokussierenden Quadrupolen. Sie ist hier im Durchschnitt um den Faktor 2 größer als in den BPMs. Das absolute Maximum ist sogar um 2.6 größer als in den benachbarten BPMs. Die Orbitänderung aufgrund von Variation der Senderfrequenz skaliert linear mit der Dispersion. Man muss also dort bei Frequenzänderungen mit doppelt so großen horizontalen Orbitänderungen rechnen, wie es durch die BPMs angezeigt wird.

3. Zwei BPMs in den kurzen Nordgeraden (bpm10 und bpm13) liegen an den Stellen der größten horizontalen Betafunktion. Sie ist hier um den Faktor 9.5 größer als an den BPM-Positionen in den Bögen. Die hier beobachtete Ablage kann daher gegenüber den anderen BPMs um den Faktor 3 größer erwartet werden, ohne dass die Orbitqualität an diesen Stellen schlechter wäre.

4. An den Stellen der größten vertikalen Betafunktion befindet sich kein BPM. Hier kann eine große unbeobachtbare vertikale Ablage auftreten. Bei den nächsten BPMs (bpm10 und bpm13) ist die Betafunktion um den Faktor 3.2 geringer, die Schwingungsamplitude also um den Faktor 1.8.

5. Zwischen dem U55-Undulator und dem letzten BPM davor (bpm34) befindet sich ein Quadrupol und ein 3°-Dipol. Das macht es schwierig, den Orbit am Quellpunkt der Undulatorstrahlung zu berechnen, da Fehlaufstellungen und Feldfehler dieser Elemente stören können.

6. Unmittelbar hinter dem SAW befindet sich kein BPM (fehlender bpm33). Das macht es praktisch unmöglich, die Ablage oder den Winkel des Orbits am Quellpunkt der Wigglerstrahlung aus den Messungen zu zu bestimmen.

4.1.1 Aufbau

Die Strahllagemonitore bestehen aus vier Pickup-Elektroden, die jeweils paarweise im Abstand von 29.8 mm bündig in die obere und untere Kammerwand eingelassen sind. Die Elektroden koppeln kapazitiv an das elektrische Feld des Strahls.

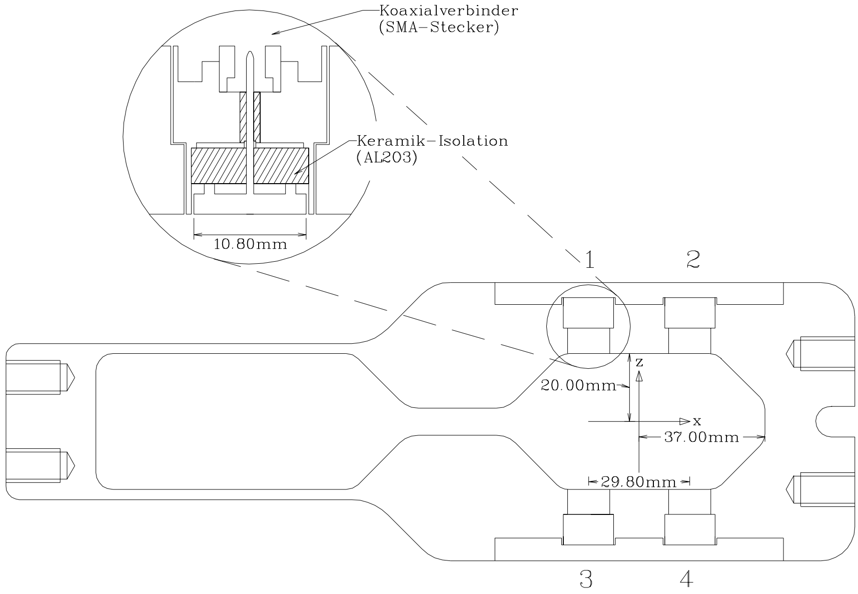


Abbildung 4.2: *Aufbau der DELTA-BPM-Kammer*

Die Ausleseelektronik misst die Pickupsignale bei der 192. Harmonischen der Umlauffrequenz, also bei der Senderfrequenz von ungefähr 500 MHz. Diese Signale werden heruntergemischt, verstärkt und gleichgerichtet. Dann werden mit einer Wiederholrate von 2.5 kHz über analoge Summen- und Differenzbildung aus den vier Signalen $s_1 \ldots s_4$ die Lagesignale s_x und s_z gebildet. In der Nähe der Kammermitte gilt folgende lineare Näherung:

$$s_x = a_x \cdot \frac{(s_2 + s_4) - (s_1 + s_3)}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \tag{4.1}$$

$$s_z = a_z \cdot \frac{(s_1 + s_2) - (s_3 + s_4)}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \tag{4.2}$$

Die Monitorkonstanten a_x und a_z können an der Elektronik eingestellt werden und sind so gewählt, dass die Ausgangssignale in beiden Orientierungen in der Kammermitte eine Skalierung von 1 V/mm haben.

Für ein Ablagesignal von etwa 2 V ist der Fehler der linearen Näherung kleiner als 1%, bei 4 V Signal ist der Fehler etwa 5%. Für größere Ablagen wächst der Fehler auf bis zu 30% bei einem Signal von 10 V. Noch größere Ablagen können nicht mehr gemessen werden, da die Ausgangssignale auf $\pm 10\,\mathrm{V}$ limitiert sind.

Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus der BPMs und der Ausleseelektronik findet sich bei Jankowiak [6].

4.1.2 Auslese

Bevor die s_x- und s_z- Signale dem Kontrollsystem zugeführt werden, durchlaufen sie einen Tiefpass, der zur Rauschunterdrückung eine Mittelung über etwa eine Sekunde durch-führt. Dadurch geht jedoch die Möglichkeit eines schnellen Feedbacks verloren. Insbesondere können die gepulsten Orbitstörungen durch den Transferkanal während der Injektion nicht erfasst werden.

Die Auslese der BPM-Elektronik erfolgt über einen CAN-Bus[1] durch CAI812[2] CAN-Module. Diese Module haben acht Eingänge für Spannungen im Bereich von ± 10 V. An ein Modul sind bis zu vier BPMs angeschlossen. Die s_x- und s_z-Signale sind jeweils paarweise an zwei aufeinanderfolgenden Eingängen angelegt.

Die Module wandeln die analogen Signale mit Hilfe von bipolaren 12-Bit ADCs mit einer Rate von 250 Hz in digitale Werte um. Der Wandlungsfehler des ADC ist mit ≤ 1 Bit angegeben. Das entspricht einer relativen Ortsauflösung von etwa

$$\delta x = \frac{10\text{ mm}}{2^{11}} \approx 5\mu\text{m} \tag{4.3}$$

in der Kammermitte.

Zur Rauschunterdrückung bildet das CAN-Modul aus 32 aufeinander folgenden Wandlungen einen auf 16 Bit skalierten Mittelwert, so dass alle 128 ms ein neuer Wert vorliegt. Dann fasst das Modul jeweils die Werte von vier Eingängen zu einem Paket zusammen und sendet es in regelmäßigen Intervallen auf den CAN-Bus. Die Intervalllänge wurde mit 100 ms – entsprechend einer Ausleserate von 10 Hz – so eingestellt, dass garantiert jeder gemittelte Wert gesendet wird.

Im Bedarfsfall kann man über weniger Werte mitteln und die Leserate bis auf etwa 200 Hz erhöhen. Dann erreicht der CAN-Bus die Grenze seiner Übertragungsgeschwindigkeit bei der erforderlichen Leitungslänge. Dies ist aber momentan noch nicht sinnvoll, solange der Tiefpass über eine Sekunde mittelt. Wenn ein schnelles Feedback oder eine bessere Auflösung erforderlich wird, muss ein anderes Auslesesystem installiert werden.

Die BPMs sind mehrfach mit Hilfe einer strahlbasierten Kalibrierungsmethode vermessen worden (siehe die Dissertationen von Jankowiak [6] und Grewe [7]). Die so für jeden BPM festgestellte Offsetkorrektur wurde in die Ausleseprogramme eingegeben und wird automatisch bei jeder Messung berücksichtigt. Es wurde gezeigt [8], dass die Genauigkeit der strahlbasierten Kalibrierung bei Delta auf auf etwa 65 μm begrenzt ist ist. Dies beschränkt die langfristige absolute Genauigkeit der Orbitauslese und somit die Reproduzierbarkeit der Strahllage.

4.2 Die Korrekturmagnete

Die Korrekturmagnete sind das wichtigste Werkzeug zur Beeinflussung des Orbits. Ihr Hauptzweck ist es, mittels gezielter Winkeländerungen Orbitstörungen auszugleichen, die durch Fehler in benachbarten Magneten verursacht werden. Darüberhinaus lassen sich durch Kombination mehrerer Korrekturmagnete lokale Orbitbeulen erzeugen, um den Orbit in einem abgeschlossenen Bereich gezielt zu verschieben (siehe Kapitel 3.2.5).

[1] Serieller Feldbus nach Standard ISO 11898

[2] Siehe Handbuch der CAI812-Module [9]

In den Speicherring Delta sind 30 horizontale und 26 vertikale Korrekturmagnete installiert. Sie werden mit `hk01` bis `hk30` bzw. `vk01` bis `vk26` bezeichnet. Um eine maximale Wirksamkeit der Magnete zu erreichen, sind diese meist an Stellen großer Betafunktion eingebaut (siehe auch Abbildung 2.1), denn wie bei Störfeldern berechnet sich die Wirkung auf den Orbit nach Gleichung (2.22).

Ausnahmen davon gibt es am Anfang und am Ende der Nord- und Südgeraden, wo einige horizontale Korrekturmagnete (`hk06`, `hk11`, `hk21` und `hk26`) an Orten kleiner horizontaler Betafunktion installiert sind. Bei diesen sind entsprechend größere Korrekturströme notwendig.

4.2.1 Aufbau

Ein Delta-Korrekturmagnet besteht aus einem Paar zusätzlicher Spulen auf dem Eisenjoch eines Quadrupols (siehe Abbildung 4.3). Diese erzeugen in der Nähe der Quadrupolachse ein Dipolfeld, welches dem Quadrupolfeld überlagert ist. Aufgrund der Geometrie des Quadrupoljochs kann so allerdings kein reines Dipolfeld erzeugt werden, für Orbitablagen unter 5 mm ist das Feld aber hinreichend konstant. Die Spulen sind für eine Bestromung mit maximal 10 A ausgelegt.

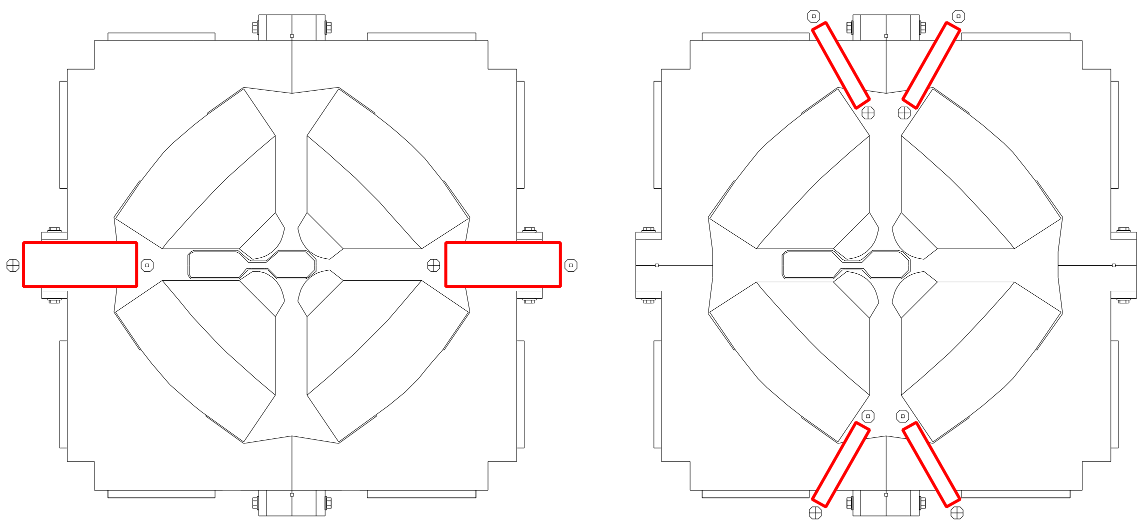


Abbildung 4.3: *Horizontale und vertikale Korrekturspulen auf den Magnetjochen der Quadrupole. Die vertikalen Spulen sind aus technischen Gründen geteilt.*

Horizontale Korrekturspulen auf kurzen und langen Quadrupolen, sowie vertikale Korrekturspulen unterscheiden sich in ihrer Stärke voneinander. Tabelle 4.1 zeigt die verschiedenen Stärken. Der Ablenkwinkel hängt bei gleichem Magnetstrom umgekehrt proportional von der Strahlenergie E ab.

Da sich die Korrekturspulen mit den Quadrupolen auf demselben Joch befinden, müssen noch Sättigungskorrekturen berücksichtigt werden, die vom Quadrupolstrom abhängen.

Korrekturspule	Stärke	maximaler Winkel bei $E = 1.5$ GeV
vertikal	0.17 mrad GeV/A	1.13 mrad
horizontal lang	0.47 mrad GeV/A	3.13 mrad
horizontal kurz	0.45 mrad GeV/A	3.00 mrad

Tabelle 4.1: *Ablenkstärken der unterschiedlichen Typen von Korrekturspulen ohne Sättigungskorrekturen. Der Maximalwinkel entspricht einem Spulenstrom von* 10 *A.*

Entsprechende Magnetfeldmessungen wurden durchgeführt [7] und werden bei der Umrechnung zwischen Ablenkwinkel und Stromstärke berücksichtigt.

4.2.2 Ansteuerung

Die Bestromung der Korrekturspulen erfolgt über unipolare stromgeregelte Netzgeräte mit Polwender. In die Geräte sind Ansteuerelektroniken mit serieller Schnittstelle eingebaut. Die Elektronik enthält einen unipolaren 12-Bit DAC für den Sollwert des Stromes, einen unipolaren 12-Bit ADC zur Auslese des Istwertes sowie eine Ansteuerung für den Polwender und für den Freigabeschalter des Leistungsteils. Die Kommunikation erfolgt über eine serielle Schnittstelle.

Das Kommunikationssprotokoll beinhaltet einen Satz von Befehlen, die jeweils durch ein Byte codiert sind. Einige davon erzeugen eine 1-Byte Antwort. In Anhang A findet sich eine Beschreibung der Funktion der einzelnen Befehle.

Die Auflösung von 12 Bit und der Maximalstrom von 10 A ergeben eine Auflösung des Soll- und Iststroms von

$$\delta I = \frac{10\,\mathrm{A}}{2^{12}} \approx 2.4\,\mathrm{mA}\,. \tag{4.4}$$

Um einen Sollwert zu setzen, muss der DAC schrittweise um δI erhöht oder erniedrigt werden. Ein direktes Setzen ist nicht möglich. Die Übertragungsrate von 19.2 kBit/s mit 8 Datenbits und je einem Start- und Stoppbit beschränkt die maximal mögliche Änderungsrate des Stroms auf

$$\frac{dI}{dt} \leq \frac{19.2\,\mathrm{kBit/s}}{10\,\mathrm{Bit}} \cdot \delta I \approx 4.7\,\mathrm{A/s}\,. \tag{4.5}$$

Um den Gerätezustand auszulesen sind mehrere Abfragen nötig. Die Steuerelektronik reagiert erst mit einer Verzögerung von etwa 100 ms auf eine Abfrage. Während dieser Zeit kann keine weitere Kommunikation mit dem Gerät stattfinden. Daher ist es nicht möglich, während einer Stromänderung gleichzeitig Informationen vom Gerät zurück zu lesen.

Die serielle Schnittstelle ist nicht direkt mit dem Steuercomputer verbunden, sondern über einen CAN-Bus. Dazu sind je vier Netzgeräte an ein CAN-Modul des Typs CCOM4[3] an-

[3] Siehe Handbuch der CCOM4-Module [10].

geschlossen. Bis zu acht Steuerbytes für ein Gerät können in einem CAN-Paket zusammen verschickt werden. Um die maximale Änderungsrate nicht einzuschränken, muss der CAN-Bus bei n angeschlossenen Geräten in der Lage sein, $n \cdot 19200/80 = n \cdot 240$ Pakete zu je 8 Bytes pro Sekunde zu übertragen.

Ein CAN-Paket besteht aus bis zu 128 Bits. Somit muss der CAN-Bus mindestens eine Übertragungsrate von $n \cdot 30.7$ kBit/s haben. Bei 52 Korrekturmagneten ergibt das fast 1600 kBit/s. Die höchste zulässige Rate ist aber nur 1000 kBit/s. Daher würde der CAN-Bus die Änderungsgeschwindigkeit der Netzgeräte beschränken, wenn alle Korrekturspulen gleichzeitig gefahren werden sollen. Außerdem ist bei 1000 kBit/s die maximal zulässige Leitungslänge auf 40 m begrenzt, was nicht ausreichend wäre, um alle Netzgeräte zu erreichen.

Um diese Beschränkungen zu beseitigen, wurde der Bus in vier separate Äste aufgespalten, die jeweils nur die Korrekturmagnete eines Quadranten des Speicherrings versorgen. Damit sinkt pro Bus die Anzahl der Geräte auf 13 und die erforderliche Übertragungsrate auf etwa 400 kBit/s. Es wurde die nächstmögliche Busrate von 500 kBit/s gewählt. Die erlaubte Leitungslänge beträgt dabei 130 m. Dies reicht aus, um alle Netzgeräte zu erreichen.

4.3 Die 3°- und 7°-Dipolmagnete

Der ovale Orbit des Speicherrings wird von 16 Dipolen mit je 20°, 4 Dipolen mit je 7° und 4 Dipolen mit je 3° Ablenkung geformt. Jeweils eine Folge 7°-3°-3°-7° bildet die langen Seiten des Ovals (siehe Abbildung 1.1). Für die 3°- und die 7°-Dipolfamilien gibt es jeweils eine eigene Stromversorgung. Die drei Stromkreise müssen korrekt aufeinander abgeglichen sein, um Orbitstörungen zu vermeiden. Insbesondere muss bei Strahlenergien über 1 GeV das unterschiedliche Sättigungsverhalten von 3°-, 7°- und 20°-Dipolen berücksichtigt werden.

4.3.1 Aufbau

Die 3°- und 7°-Dipole sind ähnlich den 20°-Dipolen Rechteckmagnete mit 64 Windungen, haben aber nur die halbe Länge. Im ursprünglichen Design des Speicherrings waren vier 10°-Dipole geplant, die mit den 20°-Dipolen in Reihe geschaltet werden sollten.

Im jetzigen Aufbau sind in den 7°-Dipolen die Hälfte der Windungen mit den 20°-Dipolen in Reihe geschaltet und erzeugen für sich somit eine Ablenkung von etwa 5°. Die anderen 32 Windungen besitzen eine eigene Stromversorgung für die restlichen 2° Ablenkung, wobei die vier Dipole untereinander in Reihe geschaltet sind.

Die vier 3°-Dipole sind ebenfalls untereinander in Reihe geschaltet und besitzen eine eigene Stromversorgung für alle 64 Windungen.

4.3.2 Ansteuerung

Der Sollstrom wird durch einen unipolaren 16-Bit DAC vorgegeben. Der Maximalstrom der Netzgeräte beträgt 500 A. Somit ergibt sich die Auflösung des Sollstroms zu

$$\delta I = \frac{500\,\mathrm{A}}{2^{16}} = 7.6\,\mathrm{mA}\,. \tag{4.6}$$

Die Ansteuerung des DAC erfolgt durch einen bei DELTA entwickelten digitalen Rampengenerator über einen parallelen Bus. Die gleiche Ansteuerung wird auch für die 20°-Dipole sowie die Quadrupole eingesetzt. Die Synchronisierung der Rampengeneratoren erfolgt über eine Taktleitung.

Für die Rücklese des Iststroms wird eine, in das Gerät eingebaute, serielle Schnittstelle genutzt, welche über ein CCOM4-Modul mit einem CAN-Bus verbunden ist. Der Wert wird als dezimale ASCII-Zeichenkette im Bereich von 00000 ($\widehat{=}$ 0 A) bis 99999 ($\widehat{=}$ 500 A) ausgegeben.

4.4 Das Hochfrequenzsystem

Der Speicherring enthält als Beschleunigungsstruktur im Westbogen ein einzelliges normalleitendes Cavity. Dieses führt dem Elektronenstrahl durch ein elektromagnetisches Hochfrequenzfeld die Leistung zu, die durch Synchrotronstrahlung in den Dipolen und Insertion Devices abgegeben wird.

4.4.1 Aufbau

Das Cavity wird mit einem 500 MHz-Sender betrieben. Die Frequenz lässt sich an einem quarzstabilisierten Frequenzgenerator in einem gewissen Rahmen verändern. Der Frequenzgenerator steuert gleichzeitig auch den Sender des Booster-Synchrotrons an. Das Cavity wird durch einen automatisch geregelten mechanischen Abstimmstempel auf Resonanz gehalten. Änderungen der Frequenz dürfen nicht zu schnell erfolgen, das sonst die Stempelsteuerung nicht folgen kann. Eine Änderungsraterate von etwa 1 kHz/s hat sich als praktikabel erwiesen.

4.4.2 Ansteuerung

Der Frequenzgenerator ist über eine GPIB-Schnittstelle[4] mit dem Kontrollsystem verbunden. Die Kommunikation erfolgt mittels ASCII-Zeichenketten. Die Frequenz kann in dezimaler Exponenzialschreibweise mit einer Auflösung von $\delta f = 0.1\,\mathrm{Hz}$ abgefragt und gesetzt werden. Sinnvoll sind für den praktischen Betrieb jedoch erst Änderungen im Bereich ab etwa 0.1 kHz.

[4] Paralleler Feldbus nach Standard IEEE 488.

Kapitel 5

Das Kontrollsystem zur Gerätesteuerung

Das DELTA-Kontrollsystem folgt einem klassischen 3-Schichten-Modell. Auf unterster Ebene befinden sich Geräte wie Sensoren und Aktoren, die mit unterschiedlichen Feldbussystemen mit verteilten Kontrollrechnern verbunden sind. Diese sind untereinander und mit den Darstellungs- und Applikationsrechnern im Kontrollraum über ein lokales Netzwerk (LAN) verbunden. (siehe Abbildung 5.1). Als Feldbussysteme werden bei DELTA hauptsächlich CAN und GPIB eingesetzt. Das lokale Netzwerk ist als 10/100 MBit Ethernet verwirklicht.

Die Kontrollsystemsoftware wurde während der Erstellung dieser Arbeit von einer im Hause entwickelten Lösung, die den Anforderungen an Effizienz und Wartbarkeit nicht mehr gewachsen war, auf EPICS (**E**xperimental **P**hysics and **I**ndustrial **C**ontrol **S**ystem) umgestellt. Dieses System wird bereits an vielen Beschleunigern und anderen großen wissenschaftlichen Einrichtungen eingesetzt.

EPICS stellt eine Softwareumgebung mit definierten Schnittstellen inklusive Netzwerkprotokoll zur Verfügung, welche durch Gerätetreiber und Anwendungsprogramme ergänzt werden kann. Vielfältige Dokumentation findet sich auf den EPICS Websites [11] im Internet. Für eine Einführung und Übersicht sind besonders [12] und [13] geeignet.

5.1 EPICS Grundlagen

Das Konzept von EPICS beruht auf sogenannten „Records“. Jede Prozessvariable, das heißt jeder Messwert, jede Stellgröße und jede davon abgeleiteten Größe, wird durch ein Record dargestellt. Dieses enthält neben dem Wert der Prozessvariablen noch weitere Attribute wie die physikalische Einheit, untere und obere Grenzen, Anzahl der gültigen Stellen, Zustandsinformationen und vieles mehr. Die Records werden auf den Kontrollrechnern verwaltet.

Es gibt Records in unterschiedlichen Typen[1]. Beispiele sind „analog input“ (`ai`), „ana-

[1] Siehe EPICS Record Reference Manual [14]

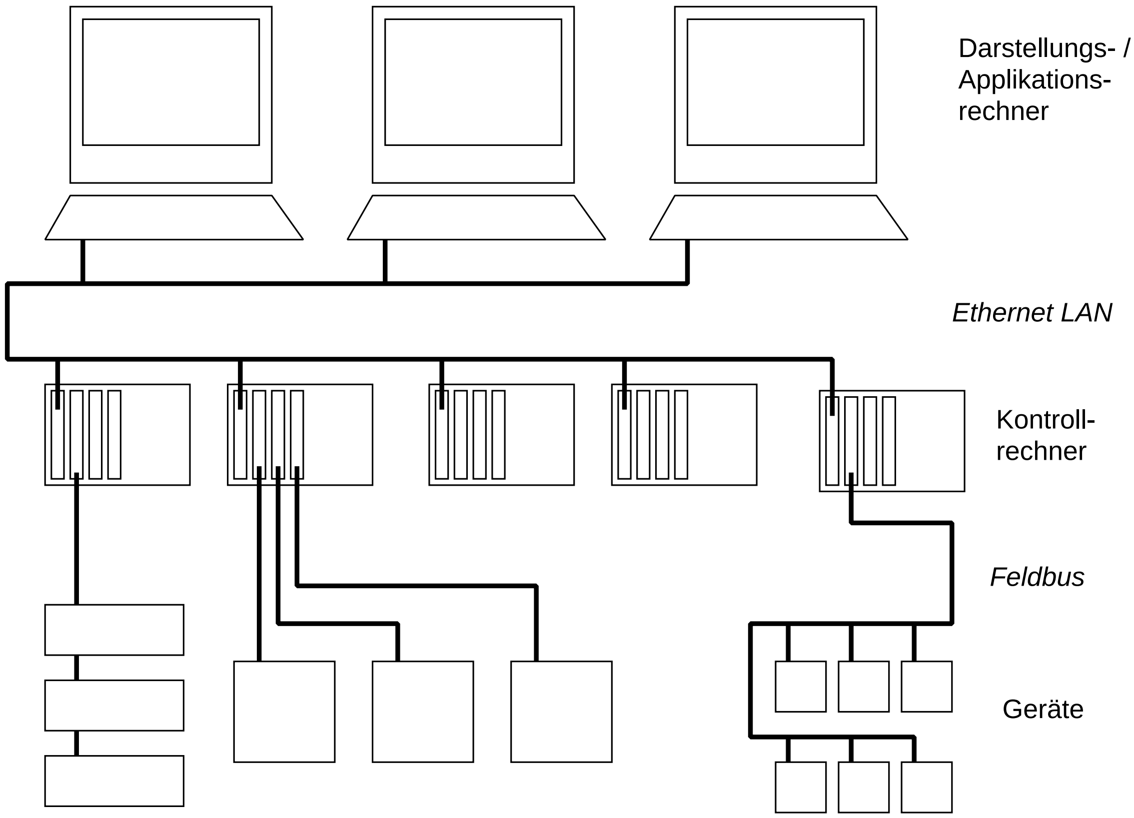


Abbildung 5.1: *Typisches 3-Schichten-Modell des DELTA-Kontrollsystems mit Geräten, Kontrollrechnern und Darstellungsrechnern.*

log output" (`ao`), „binary input" (`bi`), „calculation" (`calc`), etc. Records können Daten verarbeiten und über sogenannte „Links" Daten austauschen.

Input-Record besitzen einen Input-Link, über den sie einen Eingabewert lesen. Output-Records haben dementsprechend einen Output-Link, über den sie einen Ausgabewert schreiben. Die Links können auf Gerätetreiber oder andere Records verweisen.

Records können immer dann ihren Wert ändern, wenn sie „prozessiert" werden. Je nach Konfiguration geschieht das durch Benutzereingaben (vor allem bei Output-Records), getriggert durch andere Records (über Links), getriggert durch den Gerätetreiber oder periodisch.

Der externe Zugriff auf Records geschieht über ein IP-basiertes Netzwerkprotokoll, genannt „Channel Access". Der Zugriff kann sowohl von Anwendungen auf den Darstellungsrechnern wie auch von anderen Kontrollrechnern erfolgen. Es existieren verschiedene auf Channel Access basierende Anwendungsprogramme, wie zum Beispiel Bedienoberflächen oder Datenarchivierer.

Bei DELTA sind die meisten Anwendungen in der Programmiersprache Tcl/Tk [19] verwirklicht, für die es eine Channel Access-Schnittstelle gibt.

5.2 Gerätetreiber

Um einen neuen Gerätetyp unter EPICS zugänglich zu machen, ist es notwendig, einen passenden Gerätetreiber zu entwickeln. Dieser wird auf den Kontrollrechnern installiert und stellt die Schnittstelle zwischen dem EPICS-System und den angeschlossenen Geräten dar. Er muss daher die speziellen Eigenschaften des Gerätes berücksichtigen und Daten mit Records austauschen können.

Ein Record stellt abstrakt eine Eigenschaft des Geräts dar, z.B. den eingestellten Strom. Der Gerätetreiber ist dagegen eine Darstellung des gesamten Geräts. Verschiedene Records, die unterschiedliche Geräteeigenschaften desselben Geräts darstellen, greifen auf denselben Gerätetreiber zu.

Oftmals ist es praktisch, diesen Treiber in zwei Schichten aufzuteilen: Eine hardwarenahe Schicht befasst sich nur mit mit der Ansteuerung einer oftmals genormten Schnittstelle des Geräts. Dieser Schnittstellentreiber kann unabhängig von EPICS sein. Er stellt Prozeduren zur Verfügung, die von der anderen Schicht benutzt werden.

Die Aufgabe der zweiten, EPICS-abhängigen Schicht ist es, abhängig vom Recordtyp die richtigen Prozeduren aufzurufen und Daten mit dem Record auszutauschen. Dieses Aufteilung ist deshalb vorteilhaft, weil so für verschiedene Gerätetypen mit ähnlicher Schnittstelle derselbe Schnittstellentreiber, benutzt werden kann.

Sind Geräte über einen Feldbus wie CAN oder GPIB angeschlossen, ist es sinnvoll, eine weitere Treiberschicht einzufügen, welche die Ansteuerung des Gerätes von der des Feldbusses trennt. Auch hier kann wieder derselbe Treiber für mehrere verschiedene Geräte genutzt werden. Abbildung 5.2 verdeutlicht die Parallelität der Schichten von Hardware und Software.

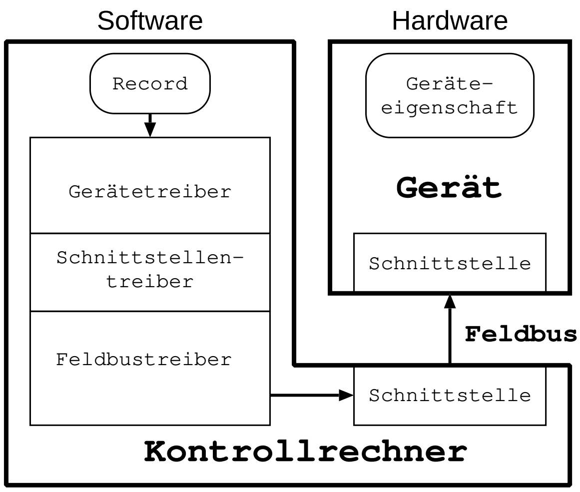


Abbildung 5.2: *Parallele Schichten in Software und Hardware.*

EPICS unterscheidet zwischen synchronen und asynchronen Treibern. Synchrone Treiber behandeln die gesamte Kommunikation mit dem Gerät in einem Durchlauf. Dabei müssen

Teile des EPICS-Systems warten, bis der Treiber seine Arbeit beendet hat. Diese Sorte Treiber sollte nur verwendet werden, wenn es bei der Kommunikation keine merklichen Wartezeiten gibt.

Asynchrone Treiber hingegen können auf Antworten des Geräts warten, ohne das EPICS-System aufzuhalten. Nach Beendigung der Kommunikation wird das Record in einem zweiten Durchlauf zu Ende prozessiert. Besonders für Geräte, die über einen Feldbus mit dem Kontrollcomputer verbunden sind, müssen asynchrone Treiber verwendet werden. Dies trifft auf die Mehrzahl der bei DELTA eingesetzten Geräte zu.

Für viele der bei DELTA bereits vor der Umstellung des Kontrollsystems verwendeten Geräte existierten keine geeigneten EPICS-Treiber. Da aber eine Neuanschaffung der Geräte nicht in Frage kam, mussten entsprechende Treiber entwickelt werden. Im Folgenden werden kurz die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Treiber für die an der Orbitkorrektur beteiligten Geräte vorgestellt.

5.2.1 Der CAN-Bus

Eine Vielzahl von Geräten, darunter auch die BPMs und die Korrekturmagnete, sind per CAN-Bus mit den Kontrollrechnern verbunden. DELTA setzt als Schnittstelle zum CAN-Bus ausschließlich VME-Karten des Typs CAN02[2] ein. Diese Karte stellt dem Kontrollrechner zwei unabhängige CAN-Bus-Schnittstellen zur Verfügung. Das CAN-Protokoll basiert auf Datenpaketen mit einer Länge von bis zu 8 Bytes und mit einer 11-Bit Adresse. Jedes angeschlossene Gerät belegt eine oder mehrere Adressen, auf denen es Daten sendet oder empfängt.

Es wurde ein flexibler, echtzeitfähiger Feldbustreiber für die CAN02-Karte entwickelt, der bei DELTA für die Kommunikation mit allen CAN-Bus-Geräten verwendet wird. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Robustheit des Treibers gegen Ausfälle einzelner Geräte oder des gesamten Busses.

Basierend auf Software aus dem EPICS-Paket wurden allgemeine Treiber für verschiedene Recordtypen auf den CAN02-Feldbustreiber angepasst, verbessert, erweitert und neu entwickelt. Diese allgemein gehaltenen Treiber sind für die meisten CAN-Paket-orientierten Geräte geeignet. Sie sind in der Lage, je nach Recordtyp, einen Wert in Form eines CAN-Pakets an ein Gerät zu senden oder ein von einem Gerät gesendetes CAN-Paket zu empfangen und einen Wert daraus zu extrahieren. Je nach Bedarf kann dabei auf asynchron gesendete Daten reagiert werden oder es können Daten per „Remote Transmission Request"[3] angefordert werden.

5.2.1.1 Die Strahllagemonitore

Die Strahllagemonitore sind an CAN-Module des Typs CAI812 angeschlossen, die ihre Daten in regelmäßigen Abständen automatisch an den Kontrollcomputer senden. Jedes

[2] Dokumentation zu dieser Karte siehe [15].

[3] Ein besonderes CAN-Paket, mit dem der Empfänger von Daten den Sender zur Datenübertragung auffordert.

CAN-Paket enthält bis zu vier Strahllagedaten von jeweils zwei Bytes Größe. Je eine Lageinformation soll in ein „analog input“-Record übertragen werden. Somit gehören zu jedem BPM zwei Records – eines mit der x-Position und eines mit der z-Position. Die CAI812 Module gehören zu den Geräten, die sich mit Hilfe des allgemeinen CAN-Treibers auslesen lassen.

Um Anwendungen wie den Orbitdarstellungs- und Orbitkorrekturprogrammen auf einfache Weise die Auslese eines vollständigen Orbitvektors zu ermöglichen, werden die Orbitdaten auch an zwei „waveform“-Records – jeweils eines für die x- und die z-Orientierung – weitergeleitet. Dieser Recordtyp beinhaltet keinen skalaren Zahlenwert, sondern einen Vektor von Werten. Anwendungen, die diese Vektoren nutzen, werden in Kapitel 6 vorgestellt.

5.2.1.2 Die Korrekturnetzgeräte

Aufgrund der komplizierten Ansteuerung der Netzgeräte für die Korrekturmagnete, welche die Einstellung von Stromwerten nur über eine Serie von UP und DOWN Befehlen erlaubt, war die Entwicklung eines speziellen Gerätetreibers notwendig. Da die Geräte über den CAN-Bus angesprochen werden, basiert auch dieser Treiber auf dem CAN02-Feldbustreiber.

Für verschiedene Betriebsmodi mussten unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden. Insbesondere sollte es möglich sein, die Ströme in mehreren Korrekturspulen synchron zueinander zu verändern, auch wenn die einzelnen Stromänderungen verschieden groß sind. Dazu müssen die UP bzw. DOWN Befehle mit unterschiedlichen Raten an die verschiedenen Netzgeräte gesendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Betriebsmodi implementiert:

Asynchroner Modus: Einem einzelnen oder mehreren Netzgeräten werden neue Stromwerte vorgegeben. Diese Werte werden unabhängig voneinander auf dem schnellsten Weg angefahren. Dieser Modus wird vor allem beim Laden von Setups oder bei der Änderung einzelner Korrektorwerte genutzt. Dies ist der Standardmodus des Treibers.

Synchroner Modus: Mehrere Netzgeräte erhalten einen neuen Sollwert, der auf ein Startsignal hin angefahren wird, so dass alle Geräte gleichzeitig beginnen und auch gleichzeitig ihren Endwert erreichen. Die Netzeräte mit geringerer Stromänderung müssen entsprechend langsamer gefahren werden. Dieser Modus wird beispielsweise für lokale Orbitbeulen genutzt, bei denen drei oder vier Netzgeräte gemeinsam geändert werden müssen, wobei die Beule die ganze Zeit über abgeschlossen bleiben soll.

Rampmodus: Die neuen Stromwerte sollen nicht nur synchron, sondern auch noch in einer bestimmten Zeit erreicht werden. Dieser Modus wird benötigt, wenn man mit gespeichertem Elektronenstrahl die Energie des Speicherrings verändern möchte. Dabei müssen die Korrekturmagnete gleichzeitig mit Dipolen, Quadrupolen und Sextupolen auf neue Werte gefahren werden. Ansonsten ist dieser Modus identisch mit dem synchronen Modus.

Abbildung 5.3 veranschaulicht die Unterschiede im Zeitverhalten zwischen asynchronem Modus und synchronem Modus. Es werden jeweils zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 neue Stromwerte für zwei Korrekturspulen gesetzt.

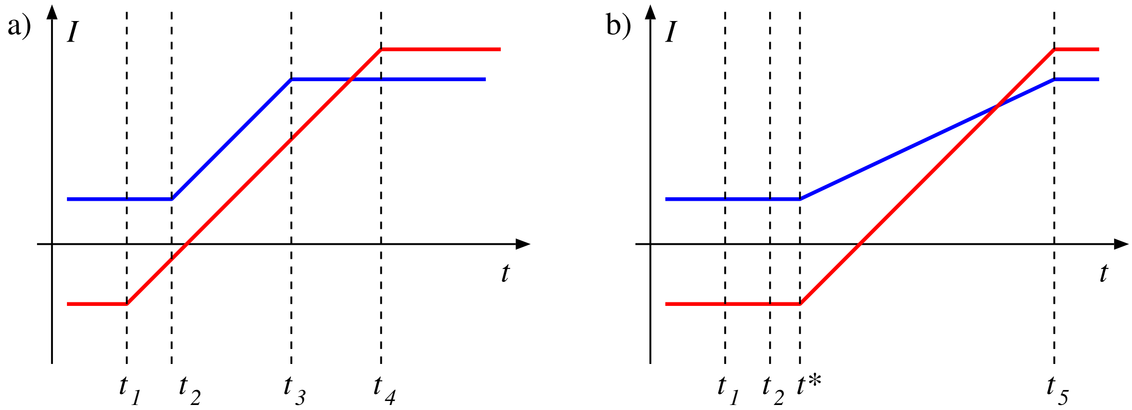


Abbildung 5.3: *Unterschied zwischen a) asynchronem und b) synchronem Modus der Korrekturnetzgeräte am Beispiel der Stromänderung zweier Korrektoren.*

a) Im asynchronen Modus ändern sich die Ströme sofort und möglichst schnell. Die Sollströme werden zu den Zeitpunkten t_3 und t_4 erreicht.

b) Im synchronen Modus ändern sich die Ströme erst beim Startsignal zum Zeitpunkt t^*. Zum Zeitpunkt t_5 werden beide Sollströme gleichzeitig erreicht.

Jedesmal, wenn ein neuer Stromwert gesetzt wird, berechnet der Treiber, wieviele UP bzw. DOWN Befehle notwendig sind, sowie ob und wann der Polwender betätigt werden muss. Im asynchronen Modus beinhaltet jedes CAN-Paket 8 Befehle, so dass der neue Stromwert möglichst schnell erreicht wird.

Im Gegensatz dazu erhalten in den anderen beiden Modi jene Geräte, die langsamer fahren müssen, im Mittel entsprechend weniger als 8 Befehle pro CAN-Paket. Dabei bestimmt im synchronen Modus das Gerät mit der größten Stromänderung die Fahrzeit, während diese im Rampmodus vorgegeben wird. Ist im Rampmodus die verlangte Rampzeit zu kurz für die gewünschte Stromänderung, wird ein Alarmstatus gesetzt, der in der Benutzeroberfläche des Maschinenbedieners auffällig sichtbar ist.

Die CAN-Pakete werden mit einer Rate gesendet, die gewährleistet, dass die serielle Schnittstelle des Netzgerätes alle Befehle rechtzeitig abarbeiten kann. Da die Schnittstelle mit 19.2 kBit/s arbeitet, ergibt sich bei 10 Bits pro Byte (Startbit + 8 Bit Daten + Stoppbit) und 8 Bytes pro Paket eine maximale Senderate von 240 Paketen pro Sekunde an ein Netzgerät.

Sicherheitshalber verwendet der Treiber nur eine Rate von 220 Paketen pro Sekunde, entsprechend einer maximalen Änderungsrate von etwa 4.3 A/s. Die Wartezeiten zwischen den Paketen für ein Netzgerät nutzt der Treiber, um die anderen Geräte zu bedienen, wodurch quasi-synchrones Fahren erreicht wird.

Desweiteren fragt der Treiber regelmäßig den Iststrom und den Status aller Geräte ab, um eventuelle Gerätefehler frühzeitig entdecken zu können. Während des Fahrens der Netzgeräte ist das jedoch nicht möglich, da die Schnittstelle des Gerätes eine relativ lange Zeit (etwa 100 ms) benötigt, um zu antworten. In dieser Zeit dürfen keine weiteren Befehle an dieses Gerät übertragen werden, so dass sich Pausen beim Ändern der Ströme ergeben würden.

Aus demselben Grund ist es dem Treiber nicht möglich, während des Fahrens zu kontrollieren, ob das Netzgerät alle Schritte korrekt empfangen hat. Erst nach Beendigung der Fahrzeit wird der gesetzte Sollwert des Gerätes kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. Es kann dadurch im Prinzip zu nicht-synchronem Verhalten der Korrekturströme kommen, welches je nach Stärke zu kurzfristigen Orbitschwankungen führen kann.

Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass derartige Übertragungsfehler zwar hin und wieder auftreten, aber so selten sind, dass der Stromfehler praktisch nie mehr als einen Schritt beträgt. Da diese Differenz sofort korrigiert wird, kann sich keine langfristige Akkumulation von Fehlern ergeben.

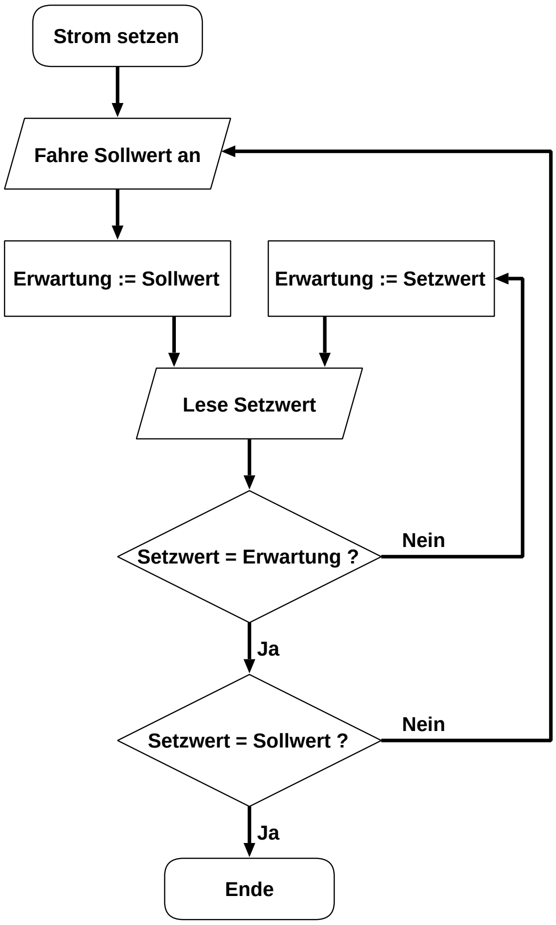


Abbildung 5.4: *Setzen und Kontrolle eines neuen Stromwertes für eine Korrekturspule.*

Ein erhebliches Problem stellten in diesem Zusammenhang Übertragungsfehler bei der Rücklese des Setzwertes dar, die zu einem fehlerhaften Korrekturversuch führten. Insbesondere wurde von Zeit zu Zeit das Vorzeichen des Setzwertes falsch gelesen, was fast zwangsläufig einen Strahlverlust zur Folge hatte. Diesem Problem konnte durch eine Konsistenzüberprüfung erfolgreich begegnet werden (siehe Abbildung 5.4), bei der im Fall der Abweichung des Rücklesewertes vom Sollwert das Gerät so oft erneut abgefragt wird, bis zweimal nacheinander derselbe Wert gelesen wird.

5.2.2 Die Dipolnetzgeräte und der Hochfrequenzgenerator

Sowohl die Ansteuerung des Frequenzgenerators wie auch die Auslese der 3°- und 7°-Dipolnetzgeräte erfolgt in Klartext über ASCII-Zeichenketten. Da eine Vielzahl weiterer Geräte auf diese Weise angesteuert werden, wurde ein konfigurierbarer Treiber entwickelt [16]. Dieser kann unabhängig vom verwendeten Feldbus (GPIB, CAN, RS232, ...) mit beliebigen Geräten kommunizieren, soweit diese Befehle in Form einer Folge von Zeichen akzeptieren.

Dieser sogenannte StreamDevice-Treiber wird mit einer einfach zu erstellenden Beschreibung des Kommunikationsprotokolls konfiguriert. Darin wird angegeben, welche Zeichenketten das Gerät erwartet und sendet. Dabei können Werte, zum Beispiel Zahlen, in die auszugebenden Zeichenketten eingefügt und aus empfangenen Zeichenketten gelesen werden. Die Werte lassen sich auf vielfältige Weise formatieren, um den Bedürfnissen unterschiedlicher Geräte gerecht zu werden. In Anhang B sind Details zum StreamDevice-Treibers erklärt.

Der normalerweise bei der Anschaffung eines neuen Gerätetyps notwendige Aufwand für die Treiberentwicklung reduziert sich durch den StreamDevice-Treiber auf ein Minimum. Eine Reihe weiterer Institute hat deshalb diesen Treiber von DELTA übernommen, darunter die Swiss Light Source, das Jefferson Lab [17] und das Diamond Projekt [18].

Kapitel 6

Mess- und Steuerungsprogramme

Die in diesem Kapitel beschriebenen Computerprogramme greifen über Channel Access auf die vom EPICS-System bereitgestellten Orbitvektoren zu. Im Gegensatz zu den im Kapitel 5.2 beschriebenen Treibern laufen diese Programme auf den Darstellungsrechnern im Kontrollraum. Die Anwendungen wurden in der Programmiersprache Tcl/Tk[1] implementiert, welche einfach zu handhabende grafische Elemente bereitstellt [19].

Diese Programme wurden nicht nur für Messungen während dieser Arbeit benutzt, sondern gehören mittlerweile zum täglichen Maschinenbetrieb. Deshalb wurde bei der Entwicklung auch besonderes Augenmerk auf die Benutzerfreundlichkeit, das heißt auf eine einfache und intuitive Bedienbarkeit, gelegt.

6.1 Die Grafische Orbitdarstellung

Um dem Maschinenoperateur einen Eindruck von der Strahllage zu geben, ist eine grafische Darstellung des Orbits wichtig. Dazu wurde eine Benutzeroberfläche erstellt, welche mehrmals pro Sekunde die Orbitvektoren ausliest. Diese werden in einer Grafik in Form zweier Kurven gegen die BPM-Positionen aufgetragen. Zur Orientierung ist entlang der horizontalen Achse die Magnetstruktur des Speicherrings schematisch eingezeichnet, angefangen bei der westlichen Bogenmitte (siehe Abbildung 6.1).

Die Orbitdarstellung erfolgt in Form von Messpunkten, die durch gerade Strecken verbunden sind. Dies entspricht zwar nicht dem tatsächlichen Strahlverlauf zwischen den BPMs, welcher nicht direkt messbar ist, ist aber besser zu erkennen als die oft üblichen Balkendiagramme, die nur an den BPM-Positionen dünne senkrechte Linien anzeigen.

Um Orbitänderungen besser verfolgen zu können, ist es möglich, den aktuellen Orbitvektor als Referenz zu definieren und sich die Differenz des aktuellen Orbits zu dieser Referenz anzeigen zu lassen. Referenzen können zur späteren Verwendung in Dateien abgespeichert und wieder geladen werden. Weiterhin kann auch der aktuelle Orbitvektor sowie der Differenzorbit abgespeichert werden.

[1] Version 8.4 mit Erweiterungspaketen BLT 2.4 und tclCa

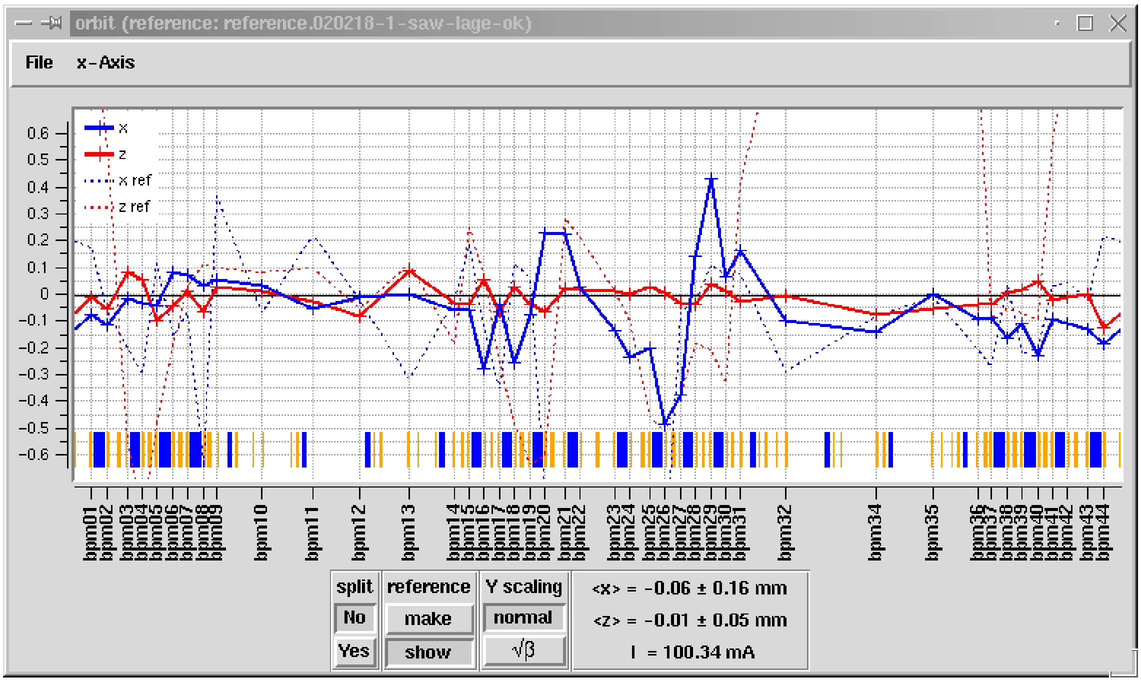


Abbildung 6.1: *Grafische Darstellung des Orbits. Die gestrichelten Kurven stellen einen Referenzorbit dar, die durchgezogenen Kurven die Differenz des aktuellen Orbits zur Referenz.*

Auf der horizontalen Achse können wahlweise die Positionen der BPMs oder der horizontalen oder vertikalen Korrekturmagnete dargestellt werden. Darüberhinaus kann der Orbit auch gegen die – aus einem Optikmodell berechnete – Betatronphase aufgetragen werden. Zur genaueren Betrachtung ist es möglich, einen Bereich der Achse auszuwählen und vergrößert darzustellen.

Die Ordinate ist frei skalierbar, so dass sowohl die relativ großen Absolutablagen wie auch die im Allgemeinen recht kleinen relativen Änderungen gut erkennbar sind. Die Orbitablagen können um die Wurzel aus der theoretischen Betafunktion herunterskaliert werden. Aufgetragen gegen die Betatronphase kann man so direkt die Betatronschwingung des Orbits betrachten.

Zur weiteren Information werden stets jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung der BPM-Signale in beiden Orientierungen sowie der aktuelle Strahlstrom angezeigt.

6.2 Die Orbit-Response-Matrix Messung

Die Zuverlässigkeit der Orbitkorrekturalgorithmen (siehe Kapitel 3.2) hängt davon ab, dass mit einer korrekten Orbit-Response-Matrix gearbeitet wird. Eine aus Optikmodellen berechnete Matrix hat sich dafür als weniger geeignet herausgestellt als eine gemessene. Response-Matrix Messungen wurden bei verschiedenen Optiken sowie mit und ohne

Betrieb des supraleitenden Wigglers durchgeführt.

Das zu diesem Zweck entwickelte Messprogramm ist weitgehend automatisiert und einfach zu bedienen, erlaubt aber auch manuelle Messungen. Für jeden Korrekturmagneten können verschiedene Änderungen des Ablekwinkels eingegeben werden. Die dadurch jeweils verursachte Orbitänderung wird erfasst, und grafisch dargestellt (siehe Abbildung 6.2).

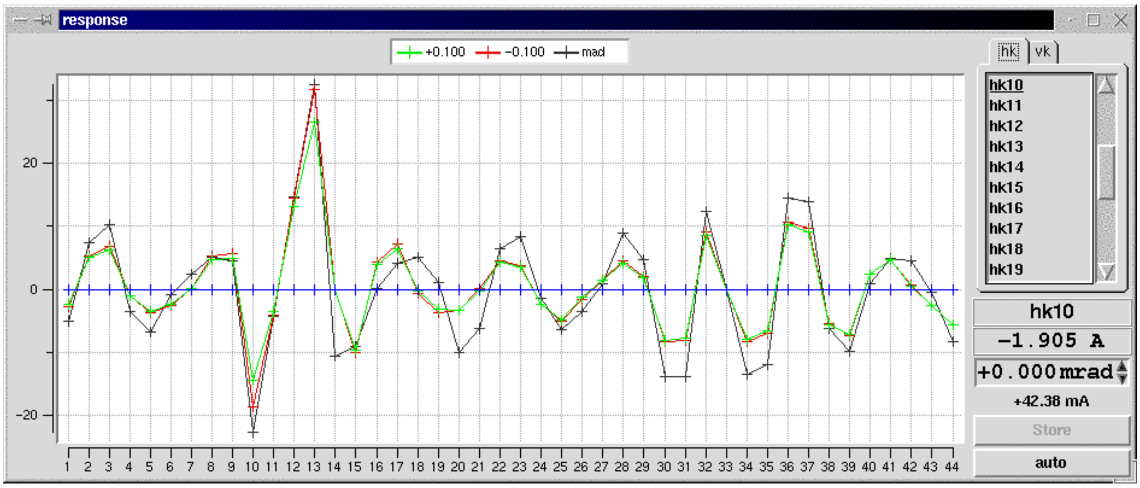


Abbildung 6.2: *Messprogramm zur Bestimmung der Beam-Response-Matrix. Auf der horizontalen Achse sind die Nummern der BPMs aufgetragen, auf der vertikale Achse die Orbitverschiebung in mm/mrad.*

Die Darstellung ist jeweils auf die Winkeländerung normiert, so dass für jeden Korrektor alle Messkurven übereinander liegen sollten, solange der Orbit linear auf Korrektoränderungen reagiert. Fehlmessungen und eventuelle Probleme mit BPMs oder Korrektoren fallen dadurch sofort auf. Weiterhin kann die Messung mit dem aus einem Optikmodell vorhergesagten Verhalten verglichen werden.

Zur manuellen Messung wählt man zunächst einen Korrektor aus. Nachdem das Programm eine Orbitreferenz erzeugt hat, kann man nun eine Winkeländerung für den Korrektor einstellen. Die dadurch erzeugte Orbitänderung wird auf diese Winkeländerung normiert und als Kurve angezeigt. Hat sich die Anzeige stabilisiert, kann man den zugehörigen Responsevektor speichern. Danach kann man weitere Winkeländerungen einstellen oder zum nächsten Korrektor wechseln. Zur Bildung einer Spalte der Response-Matrix wird von allen zu einem Korrektor gemessenen Vektoren der Mittelwert gebildet. Es ist empfehlenswert, die Orbit-Response zumindest für eine positive und eine negative Winkeländerung zu messen und die Ergebnisse auf Konsistenz zu prüfen.

Die automatische Messung wählt nacheinander alle Korrektoren an und stellt jeweils eine Winkeländerung von $+0.1$ mrad und -0.1 mrad ein. Dieser Wert hatte sich als geeignet herausgestellt. Die Messung kann jederzeit unterbrochen und später fortgesetzt werden.

Eine vollständige automatische Messung aller 56 Korrektoren dauert etwa 7 Minuten. Einzelne Messwerte können danach gegebenenfalls verworfen oder manuell erneut gemessen werden.

Durch den Vergleich mit älteren Messungen können mit Hilfe der grafischen Darstellung Änderungen im Strahlverhalten rasch erkannt werden. Diese können beispielsweise durch einen defekten BPM oder durch Probleme mit Quadrupolen oder Sextupolen verursacht worden sein. Dabei äußern sich BPM-Defekte durch Abweichungen in einzelnen Punkten der Kurve, während ein Magnetdefekt zu Phasenverschiebungen in größeren Teilen der Kurve führt.

Ebenso kann man durch Vergleich von Messungen bei verschiedener Strahlenergie Unterschiede im Sättigungsverhalten der Magneten erkennen oder den Einfluss der Insertion Devices auf die Optik untersuchen.

6.3 Lokale Orbitbeulen

Zur Erzeugung und Steuerung lokaler Orbitbeulen wurde eine Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 6.3) erstellt, welche es dem Maschinenoperateur erlaubt, aus frei wählbaren Korrekturspulen Dreier- und Viererbeulen zu erstellen. Für Dreierbeulen muss ein BPM, für Viererbeulen zwei BPMs innerhalb der Beule als Referenzpunkte angegeben werden.

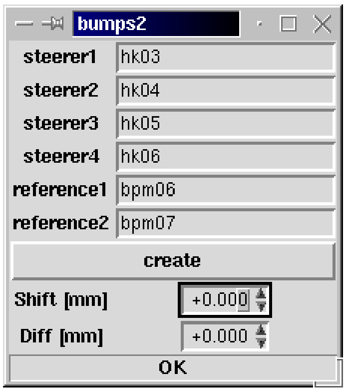


Abbildung 6.3: *Bedienoberfläche für lokale Orbitbeulen.*

Das Programm errechnet auf Basis der gemessenen Orbit-Response-Matrix eine abgeschlossene Beule und erlaubt die Einstellung der gewünschten Orbitablage an den Referenzpunkten. Im Fall von Viererbeulen kann eine durchschnittliche Ablageänderung und eine Änderung der Ablagedifferenzen eingestellt werden.

Neben der grafischen Benutzeroberfläche gibt es auch noch eine Kommandozeilenversion mit gleicher Funktionalität. Diese ermöglicht es anderen Programmen wie zum Beispiel dem BBC[2]-Programm, lokale Orbitbeulen zu nutzen.

[2]Beam Based Calibration, strahlbasierte Kalibrierung der Strahllagemonitore.

6.4 Die Orbitkorrektur

Das Orbitkorrektur-Programm ist zu einem der wichtigsten Werkzeuge für einen stabilen Strahlbetrieb des Speicherrings Delta geworden. Wahlweise wird nach einem der in Kapitel 3.2 beschriebenen Verfahren der Orbit automatisch korrigiert. Die Korrektur erfolgt in der Regel auf einen auswählbaren Referenzorbit.

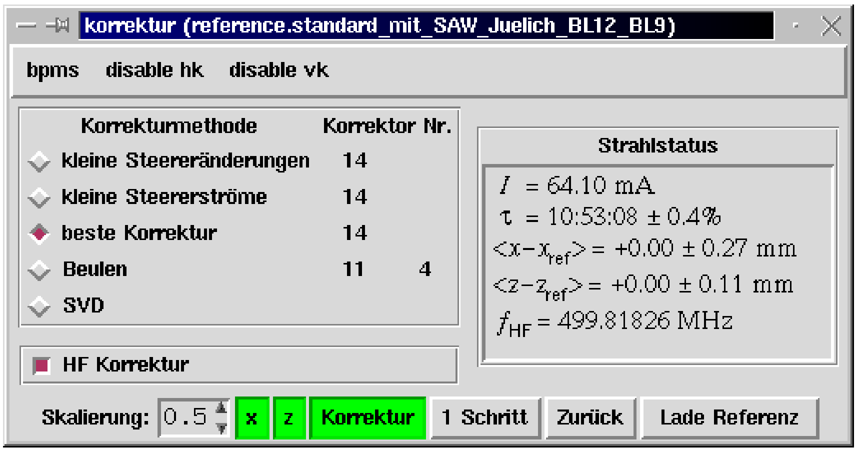


Abbildung 6.4: *Bedienoberfläche des Orbitkorrekturprogramms*

Auswahl	Verfahren	Kapitel
kleine Steereränderungen	effizientester Korrektor	3.2.2
kleine Steererströme	effizientester Korrektor mit Gewichtung	3.2.3
beste Korrektur	effektivster Korrektor	3.2.1
Beulen	lokale Dreierbeulen	3.2.5
SVD	SVD Matrixinvertierung	3.2.7

Tabelle 6.1: *Auswahl der Orbitkorrekturmethode*

Nach Tabelle 6.1 kann ausgewählt werden, welche Korrekturmethode angewendet werden soll. Der Benutzer kann sowohl einzelne Korrektoren ausnehmen als auch einzelne BPMs unberücksichtigt lassen. Das ist zum Beispiel dann sinnvoll, wenn ein BPM eine Fehlfunktion hat oder wenn gleichzeitig lokale Orbitbeulen gefahren werden, deren Ablagen von der Korrektur unberücksichtigt bleiben sollen.

Darüberhinaus können für alle BPMs Gewichtungsfaktoren eingestellt werden, um die Korrektur gezielt auf einzelne Stellen des Orbits zu konzentrieren (siehe Kapitel 3.2.3). Dies hat sich als hilfreich erwiesen, um in den Insertion Devices den Orbit besonders gut zu korrigieren.

Wahlweise kann auch eine Korrektur der Hochfrequenz zugeschaltet werden, welche dazu benutzt wird, um nach der in Kapitel 2.3 beschriebenen Methode über die Dispersion den Durchschnitt der x-Ablagen zu korrigieren.

Das Programm zeigt für beide Orientierungen ständig an, welche Korrekturmethode als nächstes welchen Korrektor bzw. welche Dreierbeule auswählen würde. Außerdem werden zur Information die wichtigsten Strahldaten angezeigt. Das sind der Strahlstrom I, die Lebensdauer τ, die mittlere Abweichung vom Referenzorbit mit der Standardabweichung in beiden Orientierungen $\langle x - x_{\mathrm{ref}} \rangle$ und $\langle z - z_{\mathrm{ref}} \rangle$ sowie die Frequenz des Hochfrequenzsystems f_{HF}.

Es kann ein Faktor eingestellt werden, mit dem der errechnete Korrekturschritt skaliert wird. Dadurch kann ein Überschwingen verhindert werden, sobald sich das System über den Bereich der linearen Näherung der Response-Matrix hinaus bewegt. Die Korrektur kann bei Bedarf auch auf eine Orientierung beschränkt werden.

Schließlich gibt es neben der ständigen Korrektur im Sekundetakt noch einen Einzelschritt-Modus mit der Möglichkeit, die letzte Korrektur zurückzunehmen. Dies ist zum Beispiel dann hilfreich, wenn über die Gültigkeit der verwendeten Response-Matrix Unklarheit besteht oder der Arbeitspunkt sensibel auf Orbitänderungen reagiert.

Es kann jederzeit ein anderer Referenzorbit geladen werden, auf den korrigiert werden soll. Eine solche Referenz lässt sich mit dem Orbitdarstellungsprogramm (Kapitel 6.1) oder von Hand mit einem beliebigen Texteditor erzeugen.

Kapitel 7

Messungen und Ergebnisse

Als vorbereitende Maßnahme wurde das Verhalten der Korrekturmagnete bei Stromänderungen vermessen. Dies sollte klären, ob sich die eingesetzten Netzgeräte überhaupt für die geplanten Orbitkorrekturverfahren eignen.

Weiterhin wurden während des normalen Nutzerbetriebs des Speicherrings wie auch bei speziellen Messschichten dem Kontrollsystem zur Verfügung stehende Daten automatisch mitprotokolliert. Die Messungen der Quadrupoldrift und des Orbits basieren auf diesen Daten.

Messungen der Orbit-Response-Matrix erfolgen regelmäßig mit Hilfe des in Kapitel 6.2 vorgestellten Programms.

7.1 Dynamisches Verhalten der Korrekturmagnete

Da die Korrekturmagnete zum Beispiel für lokale Orbitbeulen in der Lage sein sollen, synchron zu fahren, muss geprüft werden, ob der Magnetstrom dem Vorgabewert hinreichend genau folgt. Dazu wird eine Stromrampe vorgegeben und der gemessene Magnetstrom mit dem Sollwert verglichen.

7.1.1 Messaufbau

Die Netzgeräte der Korrekturmagnete haben eingebaute Messbuchsen für die Sollwertvorgabe und für den Magnetstrom. Die Sollwertvorgabe ist die vom DAC erzeugte Spannung von 0. . . 10 V, die den Leistungsteil des Netzgerätes steuert. Der Magnetstrom wird intern durch den Spannungsabfall über einem Shunt gemessen und auf 0. . . 10 V verstärkt. Somit entsprechen sowohl beim Istwert wie auch beim Sollwert 10 V Spannung einem Strom von 10 A. Beide Signale werden auf einem Speicheroszilloskop synchron angezeigt.

Es wurden mehrere Korrekturmagnete jedes Typs (vertikal, horizontal auf kurzem Joch, horizontal auf langem Joch) untersucht. Dabei zeigten sich jedoch keine deutlichen Unterschiede im Verhalten. In den Abbildungen 7.1, 7.2 und 7.3 sind die aus dem Speicheroszilloskop ausgelesenen Messkurven dargestellt.

7.1.2 Ergebnisse

Es hat sich gezeigt, dass der Strom dem Sollwert erst mit einer konstanten Verzögerung von etwa 0.1 Sekunden folgt (siehe Abbildung 7.1). Diese Verzögerung ist unabhängig vom Typ des Korrekturmagneten und der Geschwindigkeit der Rampe bei allen Netzgeräten gleich.

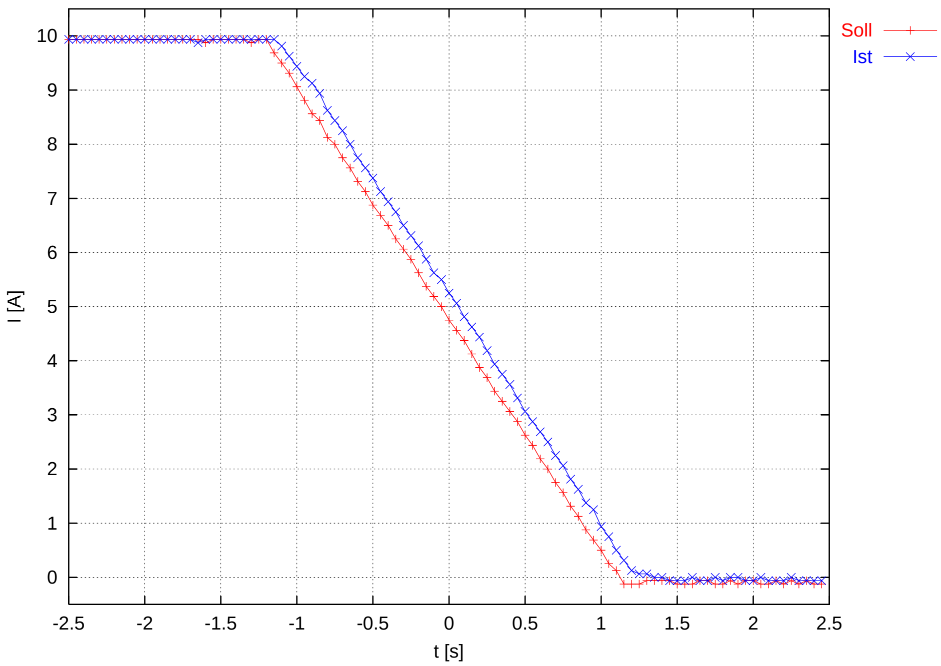


Abbildung 7.1: *Typische Rampkurve mit mit maximaler Geschwindigkeit am Beispiel des Korrektors* `vk22`.

Abbildung 7.2 zeigt die Magnetströme zweier vertikaler Korrektoren während eines Nulldurchgangs. Da die Netzgeräte negative Ströme über einen Polwender verwirklichen, ist hier nur der Betrag der Ströme zu sehen. Man erkennt, dass die Korrektoren sehr gut synchron fahren, aber auch, dass in der Nähe des Nulldurchgangs die Kurven nicht ganz linear sind.

Weiterhin ist die Stromkurve an Anfang und am Ende jeder Rampe abgerundet. Besonders gut ist dies in Abbildung 7.3 zu sehen. Der Sollwert folgt zuerst nur langsam der Vorgabe und nähert sich dem Zielwert in einem Bogen.

Auch dieser Effekt kann zu leichten Orbitstörungen am Ende des Fahrens seiner lokalen Orbitbeule führen.

7.1.3 Schlussfolgerung

Die eingesetzen Netzgeräte sind im Prinzip geeignet, synchron lokale Orbitbeulen zu erzeugen, wenn keine extremen Anforderungen an die Abgeschlossenheit der Beule während des Fahrens gestellt werden. Zu Beginn und am Ende des Fahrvorgangs sowie bei

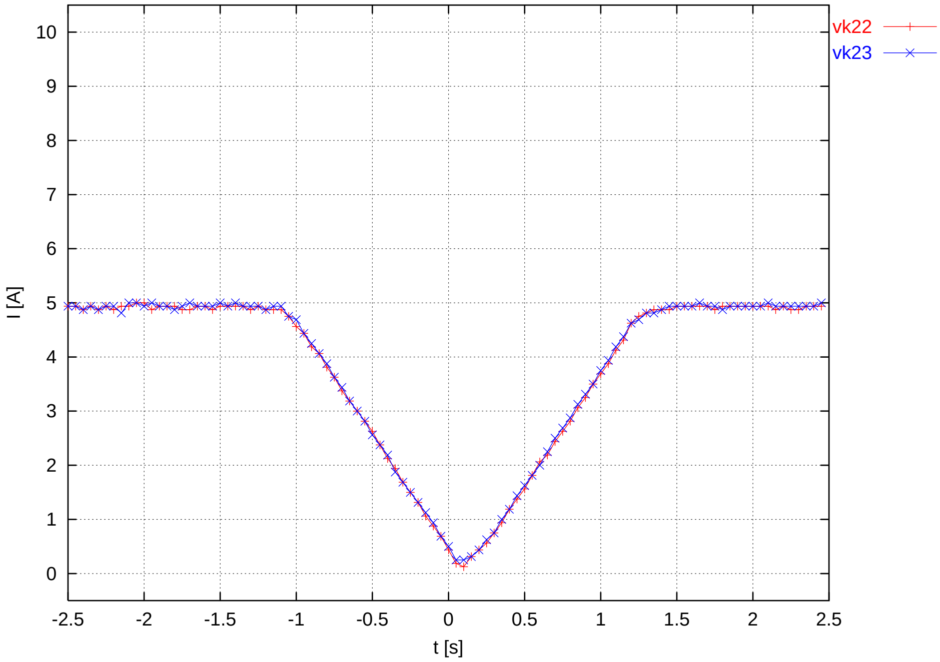


Abbildung 7.2: *Synchrone Nulldurchgänge zweier Korrekturmagneten* (vk22 *und* vk23) *mit leichter Nichtlinearität.*

Nulldurchgängen eines Korrektors wird es bei Beulen mit großen Ablageänderungen zu erkennbaren Strahlschwankungen kommen. Größere Schwankungen oder gar ein Strahlverlust sind aber nicht zu erwarten.

Wegen der Verzögerung von etwa 0.1 Sekunden sind die Netzgeräte – abgesehen von der Geschwindigkeitsbegrenzung durch die serielle Ansteuerung – nicht für ein schnelles Feedback geeignet. Korrekturen im Sekundenrhythmus, wie bei anderen Beschleunigern auch üblich, sind jedoch durchaus realisierbar.

7.2 Die Quadrupoldrift

Nachdem temperaturbedingte Quadrupolverschiebungen als Ursache der beobachteten Orbitdriften vermutet wurden, ist ein System von Temperaturfühlern und Positionsmessgeräten an verschiedenen Quadrupolen installiert worden [4].

7.2.1 Messaufbau

Bei den Positionsmessgeräten handelt es sich um induktive Wegaufnehmer mit einem Hub von 5 mm und einem Ausgangssignal von 0...10 V [20]. Die Signale werden alle 5 Sekunden ausgelesen. Die Genauigkeit ist mit 0.25% des Messbereiches (12.5 μm)

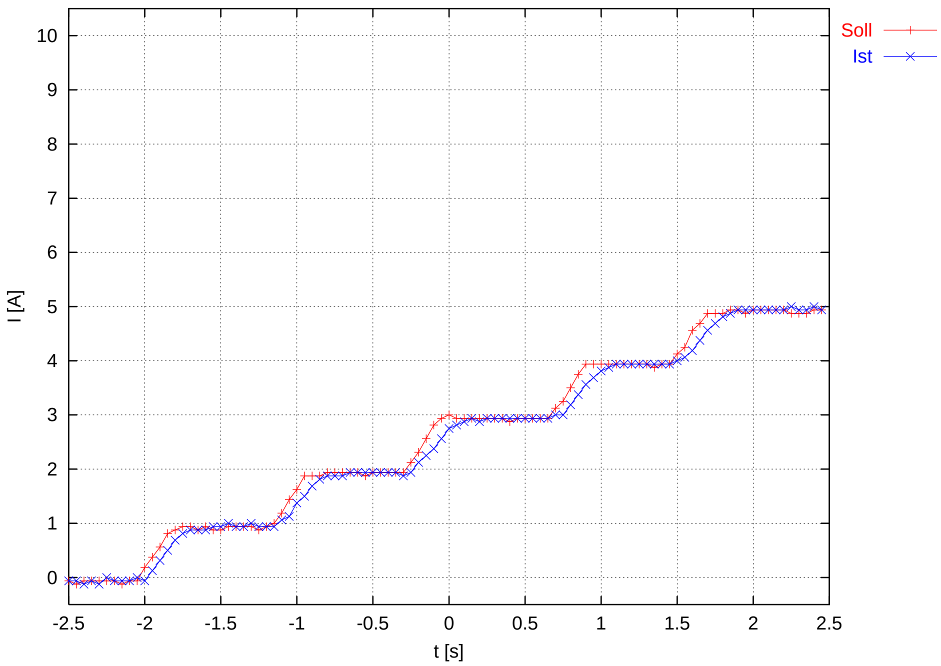


Abbildung 7.3: *Abrundung der Istwertkurve beim Start der Rampe und kurz vor Erreichen des Zielwerts am Beispiel des Korrektors* vk22.

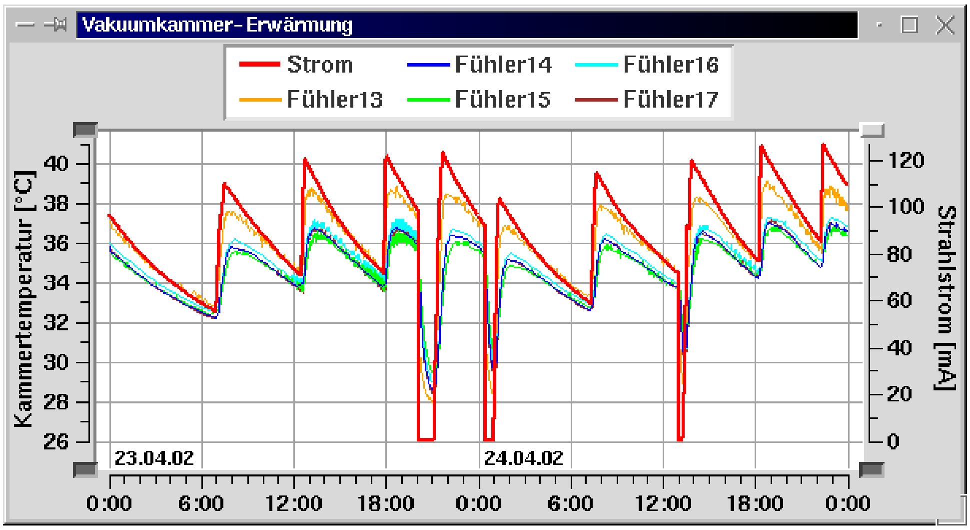
angegeben. Die Wegaufnehmer sind auf Stützen montiert und werden so gegen die Seitenfläche eines Quadrupols geschoben, dass eine Position etwa in der Hälfte des Messbereichs angezeigt wird. Es wurde ein großer Teil des östlichen Bogens von Delta mit Wegaufnehmern versehen. In diesem Bereich wurden auch mehrere PT100-Temperaturfühler entlang der Außenseite der Vakuumkammer aufgeklebt. Die Temperaturen werden alle 2 Sekunden mit einer Genauigkeit von 0.1 °C ausgelesen. Sowohl die Temperaturen als auch die Positionssignale stehen dem Kontrollsystem zur Verfügung und werden ständig protokolliert.

7.2.2 Ergebnisse

Abbildung 7.4 zeigt die Erwärmung eines Abschnitts der Vakuumkammer und die Bewegungen von vier Quadrupolen an diesem Abschnitt zusammen mit dem Strahlstrom im Laufe von zwei Tagen.

Auf allen Sensoren sind deutliche Temperaturschwankungen in Abhängigkeit vom Strahlstrom zu sehen. Bei normalem Betrieb ändert sich die Temperatur mit schwankendem Strahlstrom um etwa 2 bis 4 °C, bei Strahlverlust und erneuter Injektion um bis zu 10 °C.

Die hier vermessenen Quadrupole befinden sich auf einem gemeinsamen Abschnitt der Vakuumkammer. Dieser ist durch Faltenbälge gegen die benachbarten Kammerabschnitte beweglich. Der Quadrupol D3MQM115 ist in Strahlrichtung der erste Magnet unmittelbar nach einem Faltenbalg. Direkt danach folgt der Quadrupol D3MQM123. Beide Magnete



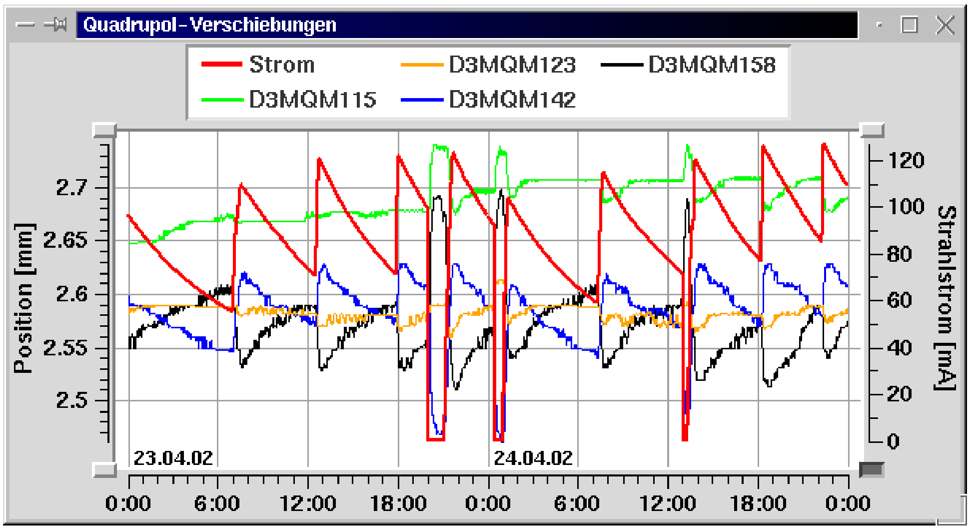


Abbildung 7.4: *Kammertemperatur bei wechselndem Strahlstrom und die dadurch bewirkte Verschiebung einzelner Quadrupole.*

zeigen eine leichte Verschiebung um einige 10 μm, wobei D3MQM115 bei Strahlverlusten deutlich reagiert.

Etwa in der Mitte des Kammerabschnitts folgt ein Ablenkdipol und dahinter der Quadrupol D3MQM142. Dieser zeigt deutliche Bewegungen nach außen bei steigendem Strahlstrom. Am Kammerende befindet sich direkt vor einem weiteren Faltenbalg der Magnet D3MQM158. Dieser bewegt sich etwa genauso stark wie D3MQM142, aber in der Gegenrichtung.

Strahlstromänderungen von 100 bis 120 mA, wie sie bei Injektion oder Strahlverlust auftreten, führen bei diesen Quadrupolen zu horizontalen Verschiebungen von 140 bis 180 μm. Auch die langsame Stromabnahme aufgrund der Strahllebensdauer erzeugt bei diesen beiden Quadrupolen deutliche Verschiebungen von etwa 60 bis 70 μm.

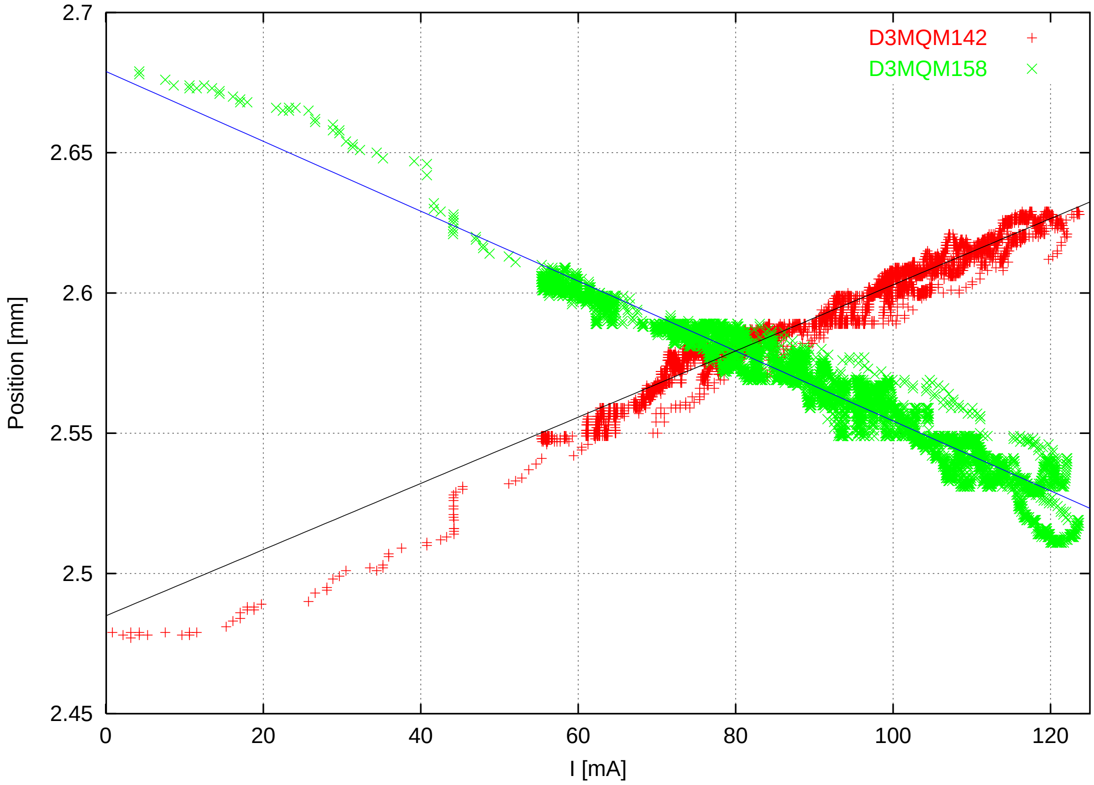


Abbildung 7.5: *Korrelation von Quadrupoldrift und Strahlstrom. Daten vom 23.4.2002.*

Trägt man die Quadrupolpositionen gegen den Strahlstrom auf, erkennt man zumindest für höhere Ströme ab ca. 50 mA einen linearen Zusammenhang (siehe Abbildung 7.5). Der Fit nach der Methode der kleinsten Abstandsquadrate ergibt eine Drift von $(1.180 \pm 0.004)\mu\mathrm{m}/\mathrm{mA}$ für den Quadrupol D3MQM142 und $(-1.227 \pm 0.004)\mu\mathrm{m}/\mathrm{mA}$ für den Quadrupol D3MQM158.

7.2.3 Schussfolgerung

Die Beobachtungen stützen die Vermutung, dass sich die Kammer durch die nur auf die Außenseite wirkende Wärmelast der Synchrotronstrahlung verbiegt, so dass die Kammermitte nach außen gedrückt wird, während sich die Kammerenden unterschiedlich stark nach innen bewegen. Die dadurch transversal verschobenen Quadrupole erzeugen bei fehlender Orbitkorrektur erhebliche Orbitstörungen, wie im Kapitel 7.3.1 gezeigt wird.

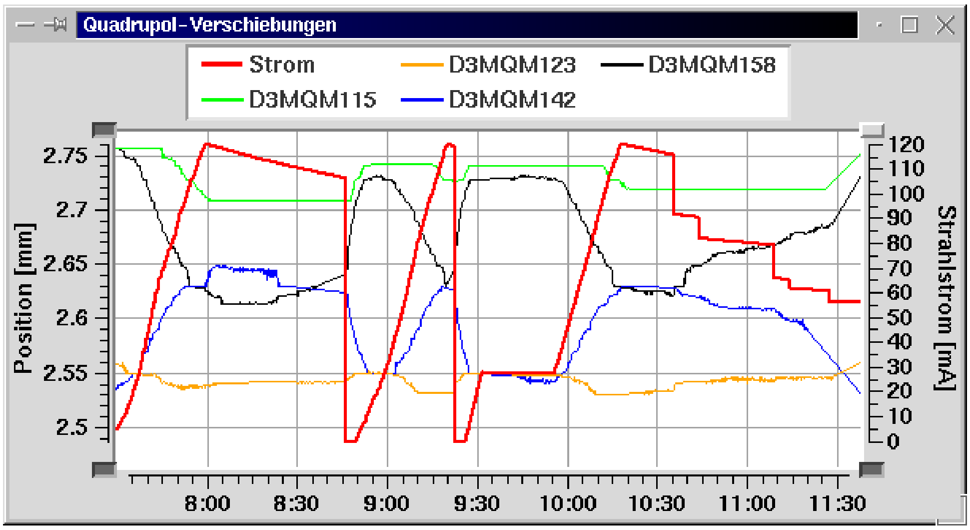
7.3 Die Orbitdrift

Die Messung des Orbits erfolgt mit Hilfe der in Kapitel 4.1 vorgestellten BPMs. Die Anbindung an das Kontrollsystem ist in Kapitel 5.2.1.1 beschrieben. Die gemessenen

Orbitvektoren für beide Orientierungen werden durch das Kontrollsystem automatisch alle 30 Sekunden protokolliert.

7.3.1 Thermisch bedingte Drift

Um die durch die Quadrupolverschiebung hervorgerufene Orbitverschiebung zu messen, wurde bei ausgeschalteter Orbitkorrektur mehrmals ein hoher Strahlstrom akkumuliert und wieder vernichtet. Der supraleitende Wiggler war bei dieser Messung ausgeschaltet.



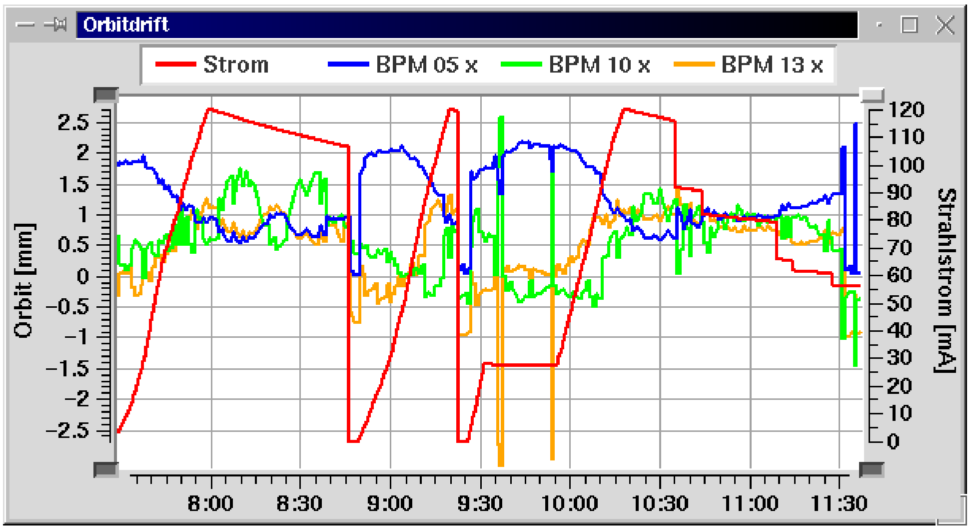


Abbildung 7.6: *Quadrupolverschiebung und die daraus resultierende Orbitverschiebung vom 8. 8. 2002 ohne Orbitkorrektur.*

Einige Quadrupole bewegen sich mehr als 100 μm (siehe Abbildung 7.6). Die daraus resultierende Orbitverschiebung beträgt zum Teil bis zu 1.5 mm, also das 15-fache der Quadrupolverschiebung.

7.3.2 Drift durch den supraleitenden Wiggler

Für die Messung der durch die ungleichmäßige Feldabnahme des supraleitenden Wigglers (siehe Kapitel 2.5.1) hervorgerufenen Orbitdrift wurde bei niedrigem Strahlstrom die Orbitkorrektur ausgeschaltet. Durch den geringen und fast konstanten Strahlstrom um 20 mA bleibt die Temperatur der Vakuumkammer praktisch unverändert, so dass Orbitänderungen durch die Drift der Quadrupole vernachlässigt werden können, wie die Messkurven in Abbildung 7.7 zeigen.

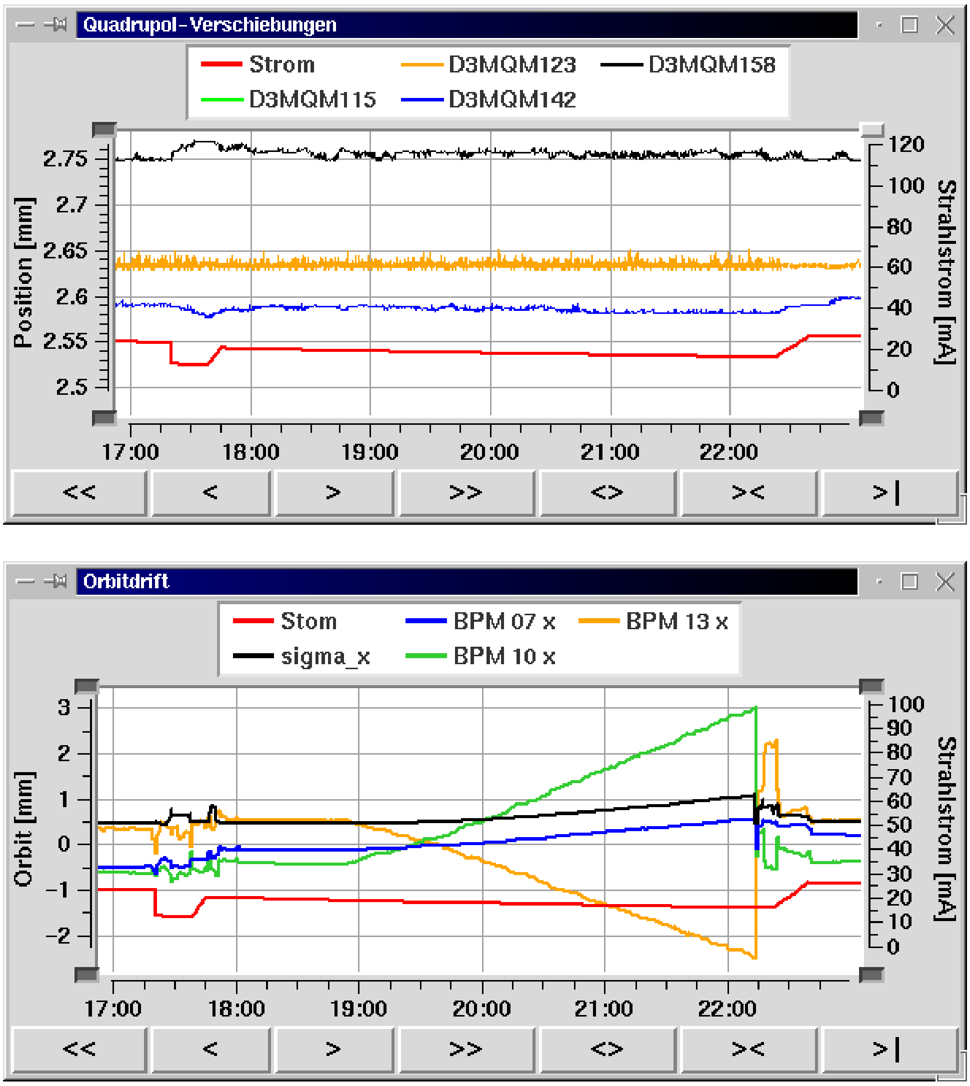


Abbildung 7.7: *Orbitdrift durch den SAW vom 16. 5. 2002 ab 18:54 Uhr. Die Quadrupolbewegung kann als Ursache für die Drift vernachlässigt werden.*

Die Bewegungen der Quadrupole liegen unter 10 μm. Dennoch ergeben sich nach dem Abschalten der Orbitkorrektur um 18:54 Uhr deutliche, bei einigen BPMs erhebliche Orbitveränderungen von mehreren Millimetern.

Abbildung 7.7 zeigt an drei BPMs exemplarisch die horizontale Orbitverschiebung über mehrere Stunden. Die Orbitverschiebung nimmt vom Moment des Abschaltens der Orbitkorrektur an linear zu. Die Monitore bpm10 und bpm13 sind an Stellen der größten Betafunktion und zeigen erwartungsgemäß die stärkste Verschiebung von etwa 1 mm pro Stunde. Der Monitor bpm07 zeigt eine durchschnittlich starke Verschiebung. Um einen Eindruck von der Änderung des gesamten Orbits zu erhalten, ist auch die Standardabweichung der Verteilung der BPM-Anzeigen (sigma_x) dargestellt. Diese wächst ebenfalls deutlich an.

Durch kurzes Zuschalten der Orbitkorrektur nach der Methode des besten Korrektors um 22:05 Uhr konnte der Orbit wieder korrigiert werden. Während der Schwankungen nach 22:05 Uhr und vor 18:00 Uhr wurden andere Untersuchungen durchgeführt, welche zu Orbitschwankungen geführt haben. Hierbei war die Orbitkorrektur nicht aktiv. Der supraleitende Wiggler war die ganze Zeit über eingeschaltet.

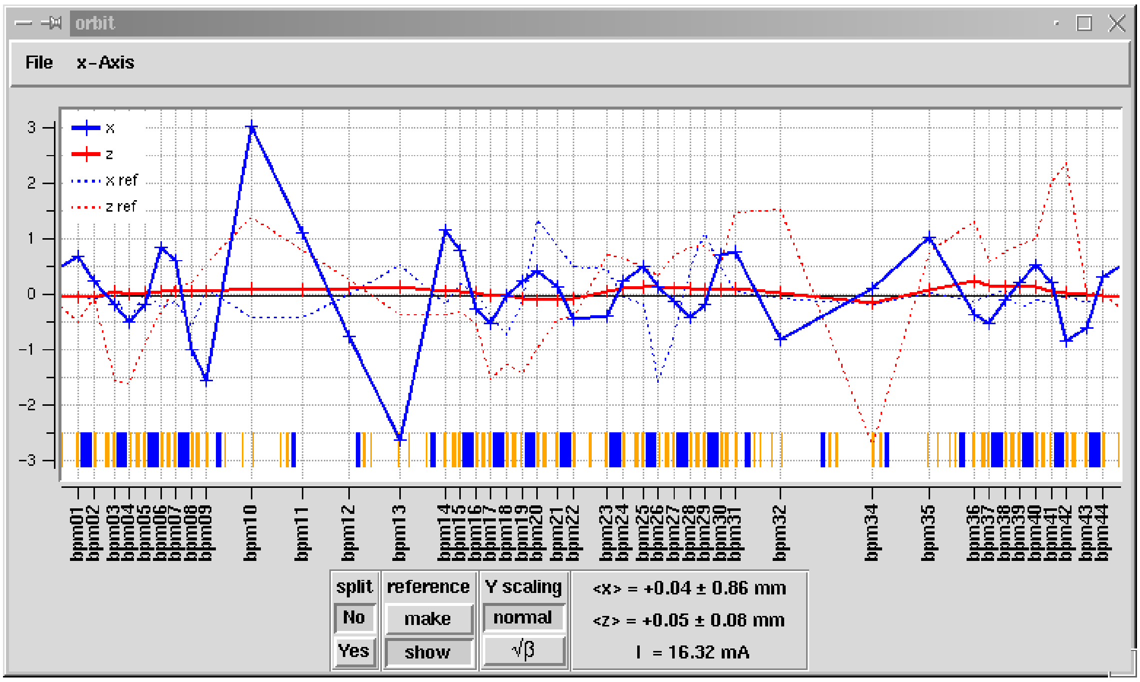


Abbildung 7.8: *Durch den SAW verursachte Orbitänderung nach 3 Stunden.*

In Abbildung 7.8 ist für dieselbe Messung die Veränderung des gesamten Orbits innerhalb von 3 Stunden dargestellt. Die hier gezeigte Orbitdifferenz wurde um 21:50 Uhr gegen eine Referenz von 18:50 Uhr aufgenommen. Man sieht eine deutliche Winkeländerung des Orbits im Bereich des Undulators U250 zwischen bpm11 und bpm12. Aus dem Abstand zwischen diesen beiden BPMs von 5.2 m und der Differenz der Orbitverschiebungen von ca. -1.8 mm ergibt sich eine Winkeländerung von etwa -0.35 mrad.

7.3.3 Störungen durch den Booster

Während der Injektion verursacht der rampende Booster regelmäßige Orbitstörungen mit einer Periode von ca. 6.5 Sekunden. Abbildung 7.9 zeigt die im Mittel 90 μm, im Maximum 300 μm großen Störungen in horizontaler Orientierung.

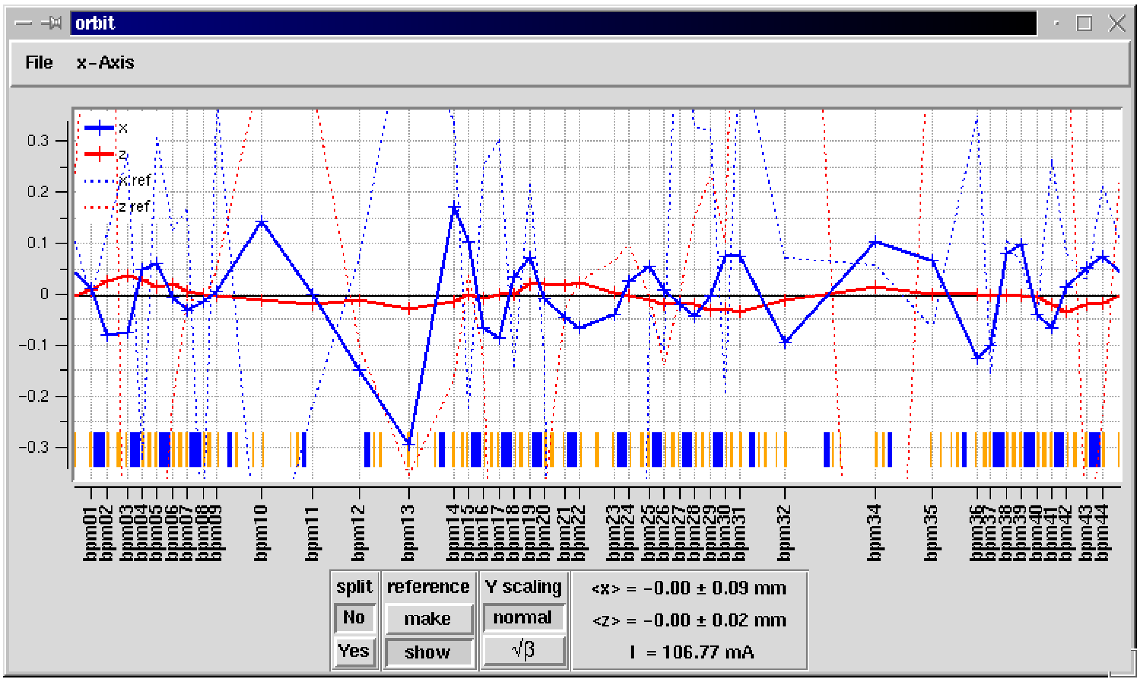


Abbildung 7.9: *Orbitstörungen durch das gerampte Boostersynchrotron.*

Da diese Orbitstörung jedoch bei jeder Injektion dieselbe ist, wirkt sie sich hier nicht negativ aus.

7.3.4 Ergebnisse

Sowohl die thermisch bedingte Bewegung der Quadrupole wie auch die Stromabnahme im supraleitenden Wiggler führen zu erheblichen Orbitverschiebungen im Bereich von mehreren Millimetern. Ein direkter Einfluss auf die Strahllebensdauer aufgrund der effektiv verringerten Apertur hat sich bei diesen Verschiebungen noch nicht feststellen lassen. Es kommt jedoch zu Winkeländerungen des Orbits an Quellpunkten von genutzter Synchrotronstrahlung. Dies ist für die Nutzer nicht akzeptabel.

Die Störungen durch den Booster treten nur während der Injektion auf und ihre Amplitude ist relativ gering. Sie stellen daher keine signifikante Beeinträchtigung dar. Die Störung durch den gepulsten Transferkanal konnte hier nicht quantitativ untersucht werden, weil die Pulse zu schnell für die momentane BPM-Auslese sind.

Tabelle 7.1 stellt die Hauptursachen für Orbitstörungen bei Delta und ihre jeweiligen Stärken zusammen.

Störungsursache	Stärke der Störung
Erwärmung der Vakuumkammer	2 mm / 100 mA
Feldverlust des Wigglers	1 mm / Stunde
Rampe des Boosters	0.3 mm alle 6.5 Sekunden

Tabelle 7.1: *Vergleich der Stärken der Orbitstörungen mit verschiedenen Ursachen.*

7.3.5 Schlussfolgerung

Bei SAW-Betrieb oder höheren Strahlströmen muss unbedingt der Orbit korrigiert werden, um die Strahllage an den Quellpunkten der Synchrotronstrahlung konstant zu halten. Auch während der Injektion sollte die Orbitkorrektur aktiv sein, um die thermische Drift bei zunehmendem Strahlstrom auszugleichen und gleichbleibende Injektionsraten zu ermöglichen.

Es gibt Überlegungen, bei DELTA das sogenannte „Topping-Up" einzuführen, das bedeutet permanente Injektion während des Nutzerbetriebs. Dadurch soll der Strahlstrom konstant hoch gehalten werden. In diesem Fall muss untersucht werden, ob die ständige Orbitschwankung durch den Booster für die Nutzer besonders des Undulators U250 akzeptabel ist. Eventuell ist hier ein schnelles Feedback oder ein Feedforward-System erforderlich. Das Problem des gepulsten Transferkanals bedarf weiterer Untersuchungen.

7.4 Die Orbit-Response-Matrix Messung

Die Messungen der Orbit-Response-Matrix erfolgten mit dem im Kapitel 6.2 vorgestellten Computerprogramm. Es wurden Response-Matrizen bei verschiedenen Optiken sowie mit ein- und ausgeschaltetem SAW aufgenommen. Diese Matrizen wurden mit den Ergebnissen aus Modellrechnungen mit dem Programm MAD [21] verglichen.

Die Einzelmessungen jedes Korrektors mit unterschiedlichen Winkeländerungen Δk sind mindestens bis ± 0.3 mrad[1] untereinander konsistent, wenn der Orbit vor der Messung nicht weiter als etwa 5 mm von der Kammermitte entfernt ist. Das bedeutet einerseits, dass der Orbit linear auf Änderungen der Feldstärken der Korrektoren reagiert. Andererseits heißt das aber auch, dass die BPMs und die Korrektoren in diesem Bereich hinreichend linear arbeiten. Um keine zu großen Orbitstörungen mit der Gefahr eines Strahlverlustes zu verursachen, wurde für die automatisierte Messung der Variationsbereich der Korrektoren auf ± 0.1 mrad beschränkt.

Während der Messungen wurden einige Defekte gefunden, die zuvor lange unentdeckt geblieben sind. So gab es einen Fehler in der Verkabelung eines BPMs, der dadurch auffiel, dass bei der Messung in der Horizontalen fast überhaupt keine Response festgestellt werden konnte, in der Vertikalen aber schon.

[1] Das sind etwa 10% der Maximalstärke eines horizontalen Korrektors.

7.4.1 Die Low-Emittance-Optik ohne SAW

Der Speicherring Delta wurde seit der Aufnahme des Nutzerbetriebes hauptsächlich mit der sogenannten Low-Emittance-Optik[2] [22] betrieben. In dieser Zeit sind mehrfach Orbit-Response-Matrizen vermessen worden.

Abbildung 7.10 zeigt eine 3D-Darstellung der gemessenen Orbit-Response-Matrizen. Man erkennt die Betatronschwingungen mit von Korrektor zu Korrektor wechselnder Phase. Abzählen der Betatronschwingungen bestätigt den ganzzahligen Anteil der Arbeitspunkte von $Q_x = 9.19$ und $Q_z = 3.28$.

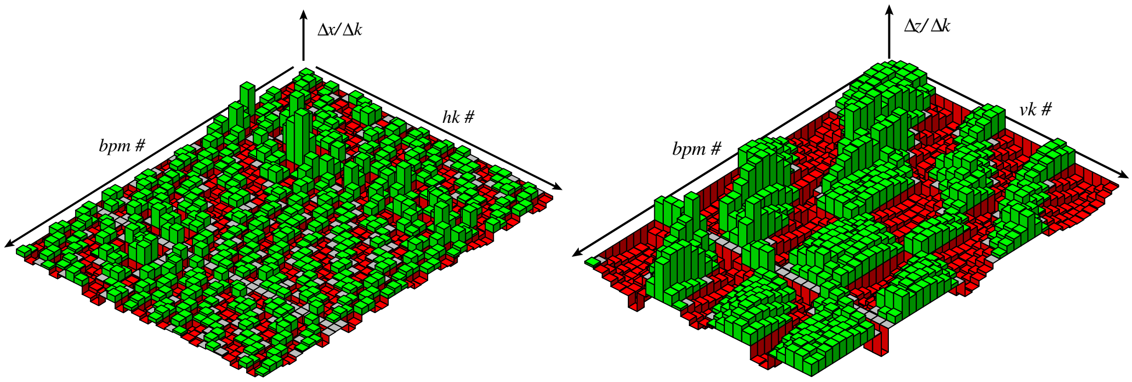


Abbildung 7.10: *Horizontale (links) und vertikale (rechts) Orbit-Response-Matrix. Die Ablageänderung pro Winkeländerung ist in willkürlicher Skalierung gegen die BPM-Nummer und die Korrektor-Nummer dargestellt. Grüne Balken entsprechen positiven Werte, rote negativen. Graue Felder haben einen Wert nahe Null. Der* `bpm33` *fehlt.*

In Abbildung 7.11 sind beispielhaft an einem Korrektor (`hk15`) die aus einer Modellrechnung vorhergesagte (`MAD`) und die in zwei verschiedenen Wochen gemessene Orbit-Response zu sehen. Die Messungen erfolgten jeweils mit ± 0.1 mrad Winkeländerung.

Man erkennt, wie sich in einigen Abschnitten die Kurven von verschiedenen Wochen gegeneinander in der Phase verschoben haben. Außerdem fällt auf, dass sich die Messkurven deutlich von der Kurve aus der Modellrechnung unterscheiden. An einigen BPMs (z.B. `bpm36` und `bpm37`) sind die Unterschiede so groß, dass die gemessene Betatronschwingung fast in Gegenphase zur Modellrechnung ist. Dadurch stimmt noch nicht einmal mehr das Vorzeichen der gemessenen Reaktion mit der Vorhersage überein. Diese Verschiebungen treten mehr oder weniger deutlich in den Response-Kurven aller horizontalen Korrektoren an denselben BPMs auf.

Ähnlich sieht die Situation in der vertikalen Orientierung aus (Abbildung 7.12). Aufgrund des niedrigeren Arbeitspunktes sind in der Vertikalen weniger Schwingungsperioden zu sehen als in der Horizontalen. Daher haben Verschiebungen der Kurven entlang der s-Koordinate auch nicht so starke Auswirkungen auf die Phase. Aber auch hier sieht man deutliche Unterschiede zwischen den beiden Messreihen und zur Modellrechnung.

[2]Die DELTA-interne Bezeichnung der Low-Emittance-Optik ist DEL-008.

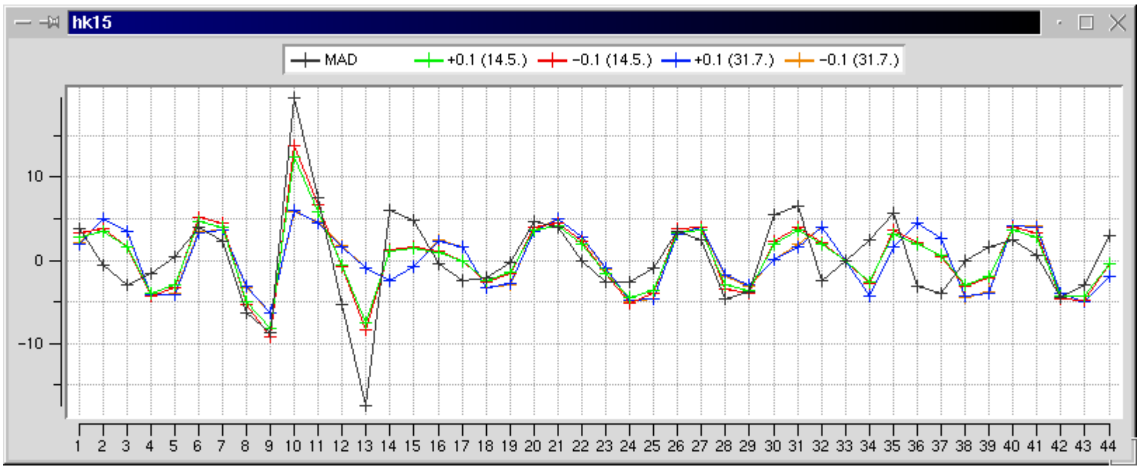


Abbildung 7.11: *Horizontale Orbit-Response auf den Korrektor* hk15. *Messungen verschiedener Wochen und Vorhersage des Modells* (MAD).

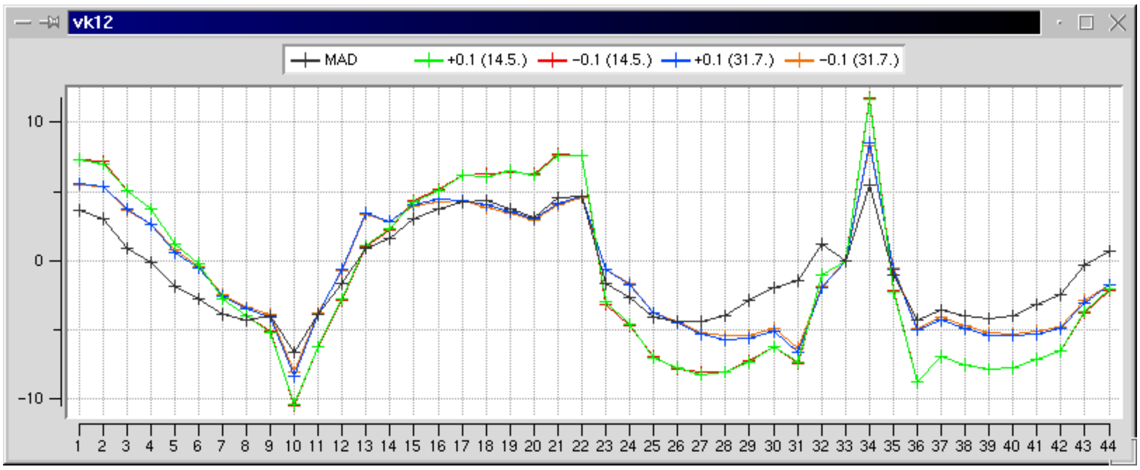


Abbildung 7.12: *Vertikale Orbit-Response auf den Korrektor* vk12. *Messungen verschiedener Wochen und Vorhersage des Modells* (MAD).

Allgemein ist die Amplitude der Betatronschwingung in der Vertikalen bei allen Korrektoren größer als vorhergesagt. Das könnte auf einen systematischen Fehler in der Berechnung der vertikalen Korrektorstärken oder in der vertikalen Skalierung der BPMs zurückzuführen sein.

In letzter Zeit gab es bei DELTA Bemühungen, das Optikmodell an die gemessene Orbit-Response-Matrix anzupassen. Zum Einen wurden dazu die Felder der Quadrupolmagnete neu vermessen. Zum Anderen wurde das Optikmodell mit verschiedenen Skalierungsfaktoren gefittet. Das hat unter anderem zu der Erkenntnis geführt, dass die verschiedenen Netzgeräte zur Versorgung der Quadrupolmagnete offenbar Skalierungsfehler haben. Näheres dazu findet sich in der Dissertation von Marc Grewe [7]. Abbildung 7.13 demonstriert die Verbesserung des Modells.

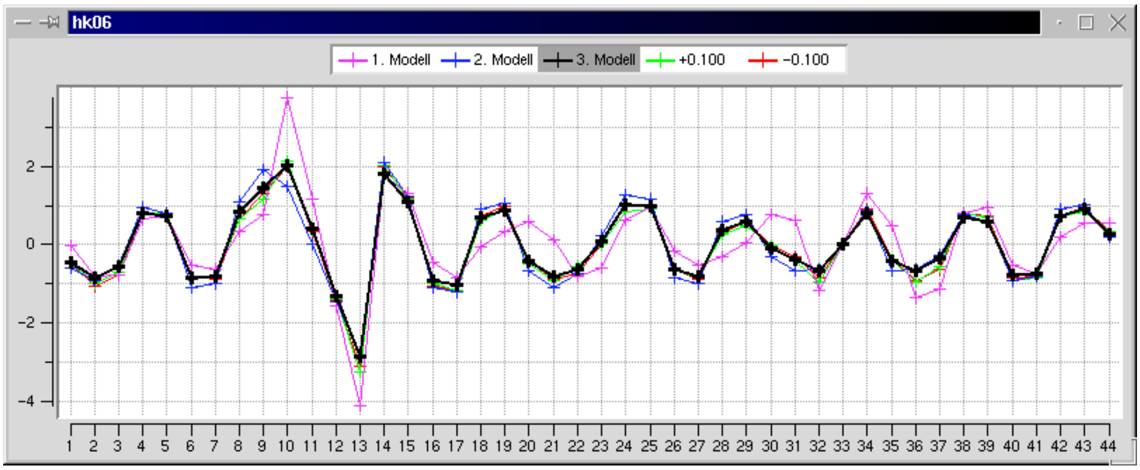


Abbildung 7.13: *Anpassung des Modells an die gemessene Response-Matrix. Drei Stufen der Modellverbesserung und gemessene Werte.*

7.4.2 Die Low-Emittance-Optik mit SAW

Seit der Inbetriebnahme der SAW-Strahllinie ist dies der Standardbetriebzustand von Delta. Die Magneteinstellungen sind fast dieselben wie ohne SAW. Der Wiggler wirkt jedoch vertikal fokussierend. Dadurch ändern sich die Betafunktionen und Phasenvorschübe. Zum Ausgleich wurden die Quadrupole in den Bögen so skaliert, dass die Arbeitspunkte wieder in etwa denen des Betriebs ohne SAW entsprachen ($Q_x = 9.17$, $Q_z = 3.30$).

In der horizontalen Orientierung ergeben sich kaum erkennbare Unterschiede zur Response-Matrix ohne SAW, wohl aber in der vertikalen. Abbildung 7.14 zeigt den Unterschied für einen vertikalen Korrektor. Man erkennt im Wesentlichen einen Unterschied in der Amplitude der Betatronschwingung.

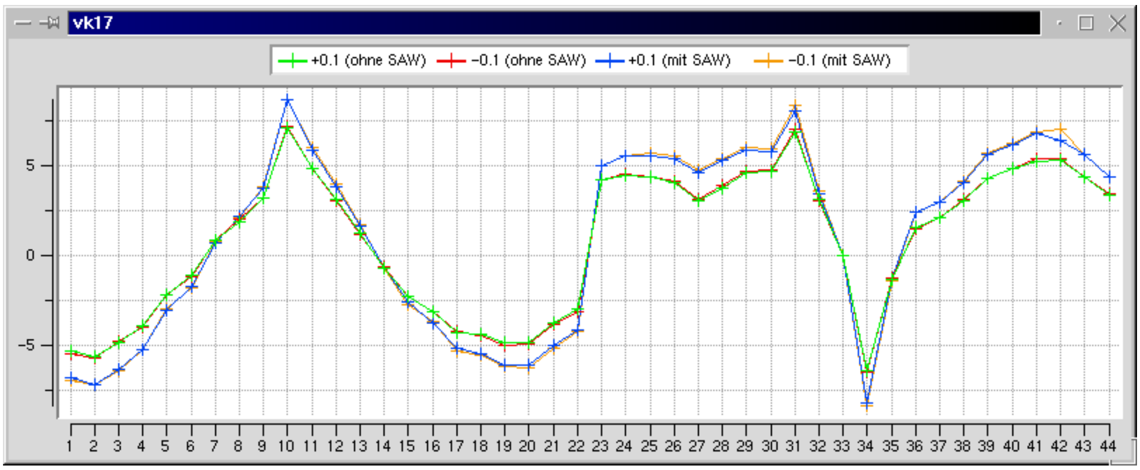


Abbildung 7.14: *Unterschiede in der vertikalen Orbit-Response durch die vertikale Fokussierung des SAW am Beispiel der Korrekturspule* vk17.

7.4.3 Die Testoptik

Zu Testzwecken wurde Delta zeitweilig mit einer anderen Optik[3] mit geringerer Fokussierung betrieben. Sie hat einen anderen Arbeitspunkt ($Q_x = 6.22$ und $Q_z = 4.17$) und geringere Maximalwerte der Betafunktionen. Der SAW wurde bei dieser Optik nicht betrieben.

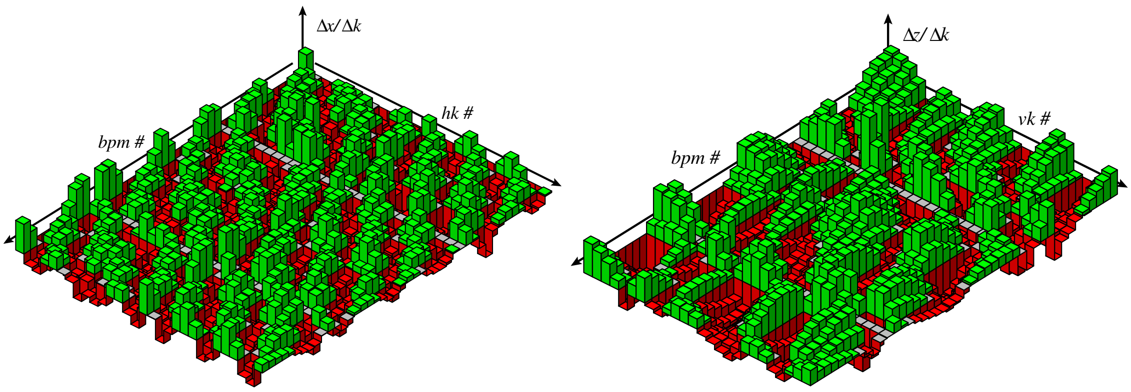


Abbildung 7.15: *Orbit-Response-Matrizen der Testoptik,* bpm14 *war außer Betrieb und* bpm33 *fehlt.*

Auch bei dieser Optik zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen der gemessenen Orbit-Response-Matrix und dem Modell. Abbildung 7.16 zeigt als Beispiel die Orbit-Response von hk12.

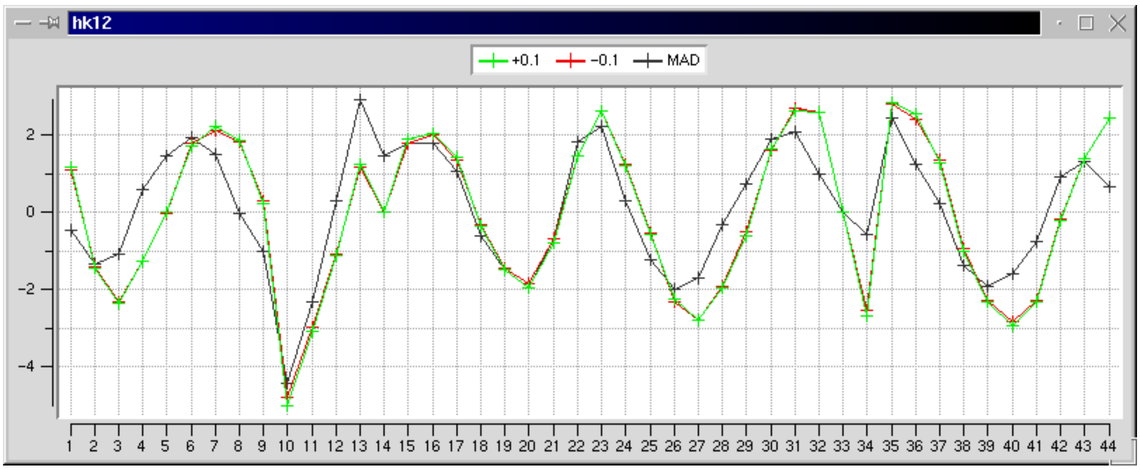


Abbildung 7.16: *Unterschiede zwischen Messung und Modell der Orbit-Response auf den horizontalen Korrektor* hk12 *mit der Testoptik.*

[3]Die DELTA-interne Bezeichnung der Testoptik ist DEL-106.

7.4.4 Schlussfolgerung

Es hat sich gezeigt, dass das reale Verhalten des Speicherrings durch das theoretische Optikmodell nur unzureichend dargestellt wird. Als Grundlage für eine effektive Orbitkorrektur ist dieses Modell daher nicht geeignet. In der Low-Emittance-Optik wurden besonders in der horizontalen Orientierung starke Phasenverschiebungen zwischen Modell und Messung festgestellt. Diese lassen darauf schließen, dass die Fokussierung der Maschine gerade bei einer stark fokussierenden Optik nicht den Sollwerten entspricht.

Die gemessenen Orbit-Response-Matrizen können die Grundlage für eine Verbesserung des Modells stellen. Die dazu notwendigen Fits geben Hinweise auf die Gründe für die bisherigen Abweichungen. Somit verhelfen die Orbit-Response-Messungen zu einem besseren Verständnis der Eigenschaften des Speicherrings Delta. Bis dahin ist es auf jeden Fall sinnvoller, die Orbitkorrektur auf Basis der Messdaten durchzuführen.

Mit einem verbesserten Optikmodell wäre es dagegen möglich, auch für das Strahlverhalten zwischen den BPMs sinnvolle Vorhersagen zu machen. Auf diese Weise können zum Beispiel in lokalen Orbitbeulen (siehe Kapitel 3.2.5) auch andere Referenzen als BPM-Ablagen zu verwenden. Insbesondere ist die Einstellung von Ablagen und Winkeln an den Quellpunkten der Synchrotronstrahlung in den Insertion Devices gewünscht.

7.5 Lokalisierung von Magnetfehlern

Ende Juli 2002 wurden plötzliche Sprünge des Orbits festgestellt, die zunächst nicht erklärbar waren. Mit Hilfe des Orbitanzeigeprogramms wurde daraufhin die Orbitbewegung gegen eine zuvor aufgenommene Referenz beobachtet. Der Vergleich dieser Orbitdifferenz mit den Orbit-Response-Vektoren hat den Ort der möglichen Fehlerursache stark eingegrenzt, da nur wenige Response-Vektoren ähnlich zur Orbitdifferenz waren. Nachdem sich die zuerst als Ursache vermuteten Korrekturspulen als fehlerfrei erwiesen hatten, fand man in einem benachbarten Dipol einen Teilkurzschluss mit schwankendem Übergangswiderstand.

Dieses Beispiel zeigt, wie sich Orbitstörungen mit Hilfe der Orbit-Response-Matrix lokalisieren lassen. Der Vergleich der Orbitabweichung mit den Response-Vektoren erfolgt dabei über die Kollinearität der beiden Vektoren

$$C_j = \frac{\Delta\vec{x} \cdot \vec{r}_j}{|\Delta\vec{x}|\,|\vec{r}_j|}\,. \tag{7.1}$$

Korrektoren, für die C_j nahe 1 ist, sind Kandidaten dafür, dass sich die Störung in ihrer Nähe befindet.

7.6 Die Dispersion

Die Dispersionsfunktion wurde vermessen, indem die Hochfrequenz um ± 15 kHz in 5 kHz-Schritten verändert wurde. Der Orbit wurde mit Hilfe des in Kapitel 6.1 vorgestellten Programms mit einer zuvor aufgenommenen Referenz verglichen (siehe Abbildung 7.17).

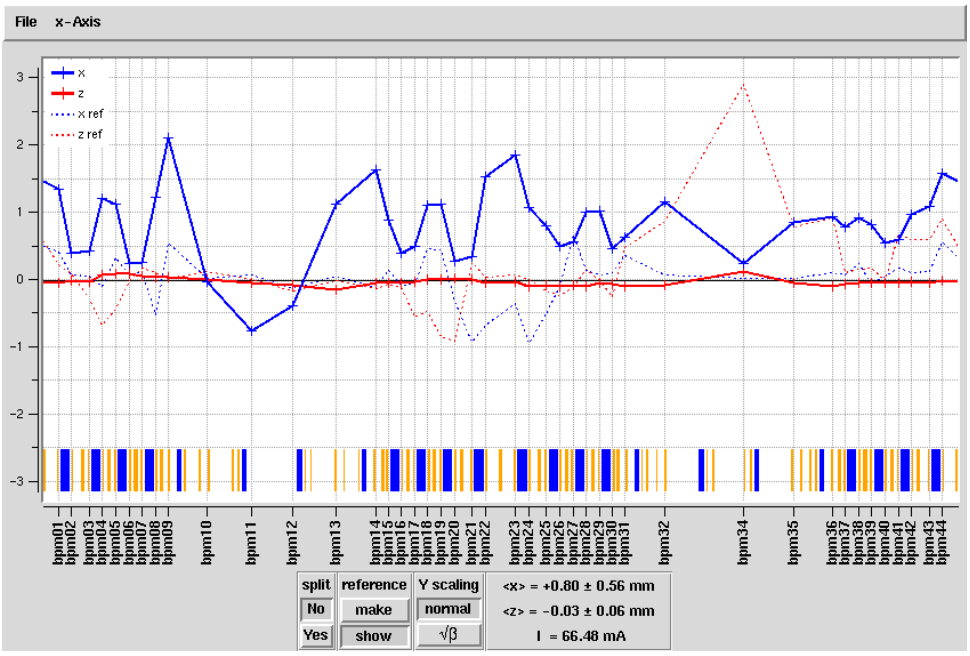


Abbildung 7.17: *Dispersionsorbit durch Veränderung der Hochfrequenz um -15 kHz. Die Asymmetrie um die Gradenmitten* (bpm10 *bis* bpm13 *und* bpm32 *bis* bpm35) *wird durch den SAW verursacht.*

Das Programm zeigt unter anderem die durchschnittliche Orbitablage in den BPMs gegen die Referenz an. Diese ändert sich linear mit der Frequenzverschiebung:

Δf_{HF} [kHz]	$\langle x \rangle_{\mathrm{BPMs}}$[mm]
-15	0.80
-10	0.53
-5	0.27
0	0.00
$+5$	-0.26
$+10$	-0.54
$+15$	-0.81

Somit ergibt sich eine dispersionsbedingte Verschiebung der durchschnittlichen BPM-Ablagen von $\langle \Delta x \rangle_{\mathrm{BPMs}} / \Delta f = -0.053$ mm/kHz.

Zum Vergleich kann man nach Gleichung 2.13 die theoretische durchschnittliche Verschiebung in den Dipolmagneten berechnen:

$$\langle \Delta x \rangle_{Dipole} / \Delta f = -\frac{1}{2\pi}\frac{nc}{f^2} \tag{7.2}$$

$$= -\frac{1}{2\pi}\frac{192 \cdot 3 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}}{(500\,\mathrm{MHz})^2} \tag{7.3}$$

$$= -0.037\,\mathrm{mm/kHz} \tag{7.4}$$

Dieser Wert liegt in der Größenordnung des Messwertes, ist jedoch etwas geringer. Das ist aber auch zu erwarten, da die Dispersionsfunktion in den Mitten der Dipolmagnete ihre Minima erreicht und somit geringer ist als in den BPMs, von denen sich die meisten kurz vor und hinter den Dipolmagneten befinden.

7.7 Die Orbitkorrektur

In den letzten Monaten war das Orbitkorrekturprogramm (siehe Kapitel 6.4) bei Nutzerschichten ständig im Einsatz. Der Orbit wurde in beiden Orientierungen auf eine Referenz korrigiert, die sowohl eine konstant gute Injektion ermöglicht, wie auch für die Nutzer eine stabile Strahllage in den Insertion Devices sicherstellt. Darüber hinaus ist der Referenzorbit in der Vertikalen so gewählt worden, dass es nicht zu unerwünscht hohen Kammererwärmungen kommt. Dies ist in der Vergangenheit aufgetreten, wenn die in den Dipolmagneten entstehende Synchrotronstrahlung die Vakuumkammer oberhalb oder unterhalb der mittig installierten Kammerkühlung traf.

7.7.1 Bester-Korrektor-Methoden

Der Orbit kann mit den drei globalen „bester Korrektor“-Methoden gut konstant gehalten werden. Die Korrektur der neu eingeschalteten Maschine auf einen gespeicherten Referenzorbit funktioniert standardmäßig mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 20\,\mu$m horizontal und $\pm 10\,\mu$m vertikal, wie Abbildung 7.18 zeigt.

Orbitverschiebungen durch den SAW können über viele Stunden hinweg unterdrückt werden, solange bis die benutzten Korrektoren ihre Maximalströme erreicht haben. Werden die Magnetströme des Wigglers vor jeder erneuten Injektion[4] wieder aufgefrischt [23], kann auch hierbei der Orbit so korrigiert werden, dass der noch gespeicherte Strahl nicht verloren geht.

Orbitbewegungen durch die thermische Drift sind praktisch nicht mehr zu beobachten. Die Korrektur ist auch während der Injektion aktiv und stellt trotz des zunehmenden Strahlstroms eine gleichbleibende Injektionsrate sicher.

[4]Injektionen finden etwa alle 5 bis 7 Stunden statt.

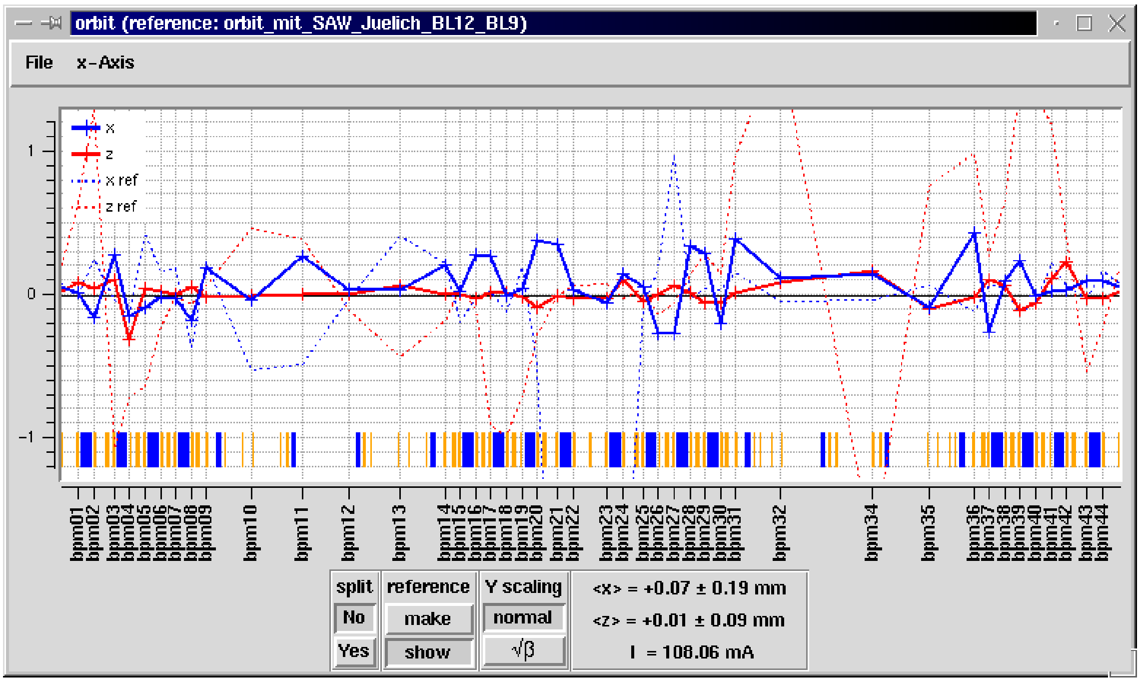


Abbildung 7.18: *Korrigierter Orbit bei Standardbetrieb. Die Standardabweichung des Orbitfehlers beträgt ±0.19 mm horizontal und ±0.09 mm vertikal.*

7.7.2 Lokales Orbit-Feedback

Ein lokales Orbit-Feedback (siehe Kapitel 3.2.6) war die erste an Delta implementierte automatische Orbitkorrektur. Es hat sich für die Inbetriebnahme des supraleitenden Wigglers als überaus hilfreich erwiesen. Der Einfluss des abnehmenden Wigglerfeldes auf den Orbit und damit auf den Synchrotronstrahlungsquellpunkt der U250-Nutzer konnte erfolgreich mit Hilfe je eines horizontalen Korrektors vor und hinter dem SAW unterdrückt werden. Die sich bildende horizontale Orbitbeule im SAW stellt aufgrund des breiten Strahlfächers keinen Nachteil für die Nutzer der Wigglerstrahlung dar. Mittlerweile ist dieses Verfahren jedoch durch die globale Orbitkorrektur abgelöst worden.

7.7.3 Lokale Orbitbeulen

Das Orbitkorrekturprogramm enthält die Option, lokale Dreierbeulen zur Korrektur zu benutzen. Dieses Verfahren wurde bislang jedoch nur selten eingesetzt. Für die erste Justierung des Strahl nach der Installation einer neuen Optik ist diese Methode recht erfolgreich. Es können damit rasch Orbitbeulen korrigiert werden, die nach der ersten Korrektur mit einem „bester Korrektor"-Verfahren übriggeblieben sind. Diese Orbitbeulen konvergieren ansonsten nur relativ langsam gegen den Referenzorbit.

Lokale Beulen finden aber in anderen Bereichen außerhalb der automatischen Orbitkorrektur Anwendung. So benutzt das Programm für die strahlbasierte Kalibrierung der BPMs (BBC) lokale Dreierbeulen. Von den Synchrotronstrahlungsnutzern gewünschte

Verschiebungen des Orbits in den Insertion Devices werden zumeist mit Hilfe lokaler Viererbeulen vorgenommen.

Die Abgeschlossenheit und korrekte Skalierung der lokalen Orbitbeulen konnte durch Messungen bestätigt werden. Abbildungen 7.19 und 7.20 zeigen Beispiele abgeschlossener lokalen Dreierbeulen.

Befinden sich allerdings Dipolmagnete im inneren einer horizontalen Orbitbeule, so ist der Orbit im Außenbereich der Beule auf eine Dispersionsbahn verschoben (siehe Kapitel 3.2.5). Abbildung 7.21 zeigt eine solche Dreierbeule. Erst durch Anpassung der Hochfrequenz um $+6$ kHz wurde die Beule abgeschlossen (siehe Abbildung 7.22).

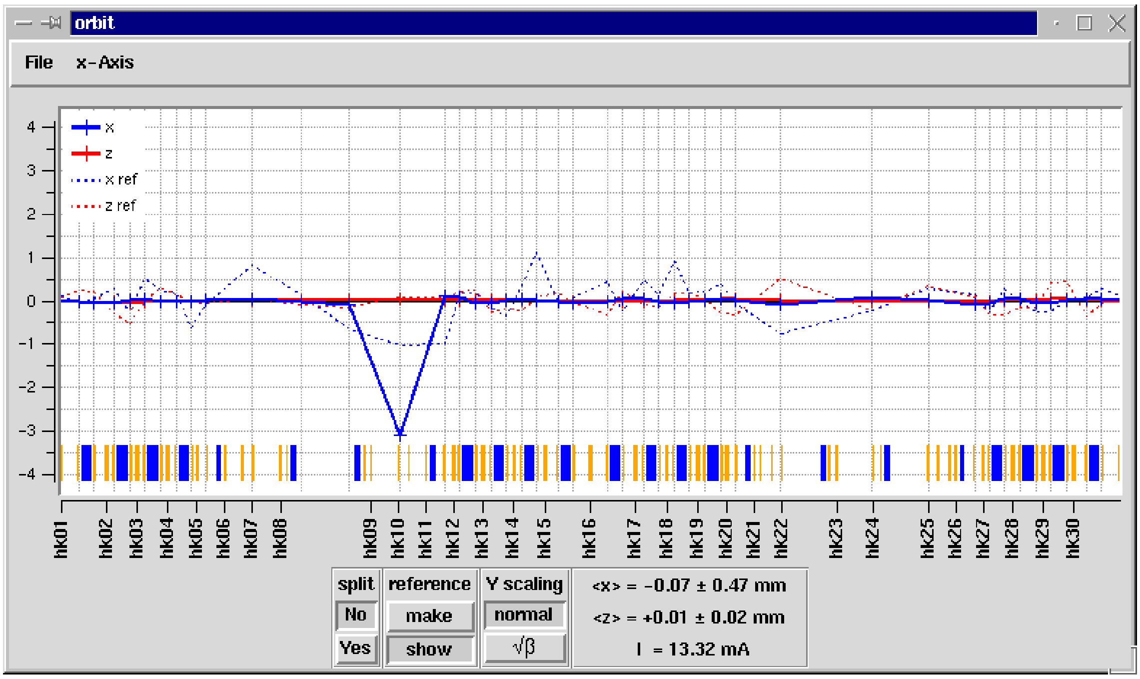


Abbildung 7.19: *Horizontale Orbitbeule mit -3.0 mm Ablage an* bpm13. *Die Dreierbeule wird von den Korrektoren* hk09, hk10 *und* hk11 *gebildet.*

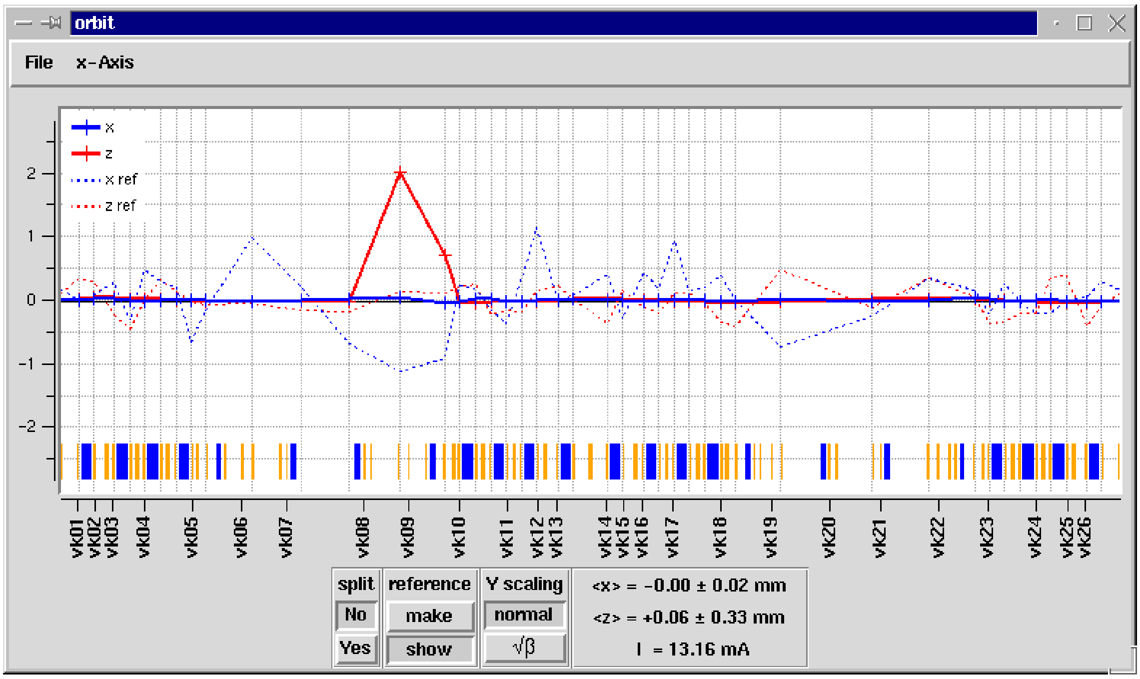


Abbildung 7.20: *Vertikale Orbitbeule mit +2.0 mm Ablage an* bpm13. *Diese Beule wird von den Korrektoren* vk08, vk09 *und* vk10 *gebildet.*

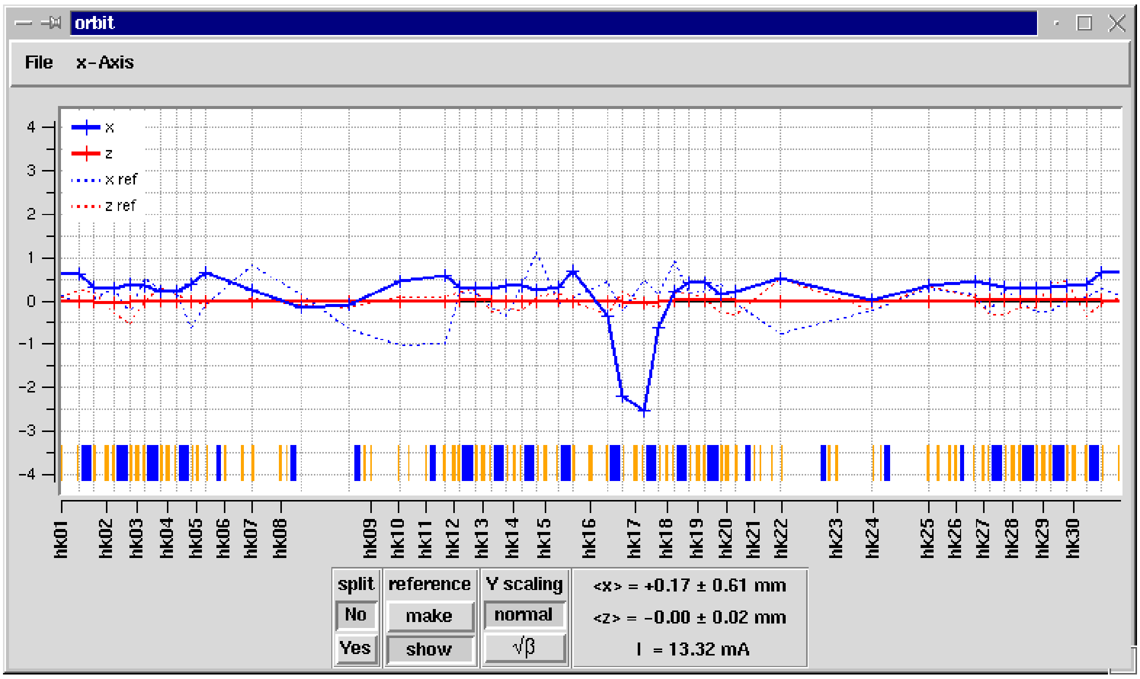


Abbildung 7.21: *Unabgeschlossene Orbitbeule mit den Korrektoren* hk16, hk17 *und* hk18. *Die Beule schließt einen 20°-Dipol ein. Es wurde eine Ablage von -3.0 mm an* bpm25 *eingestellt.*

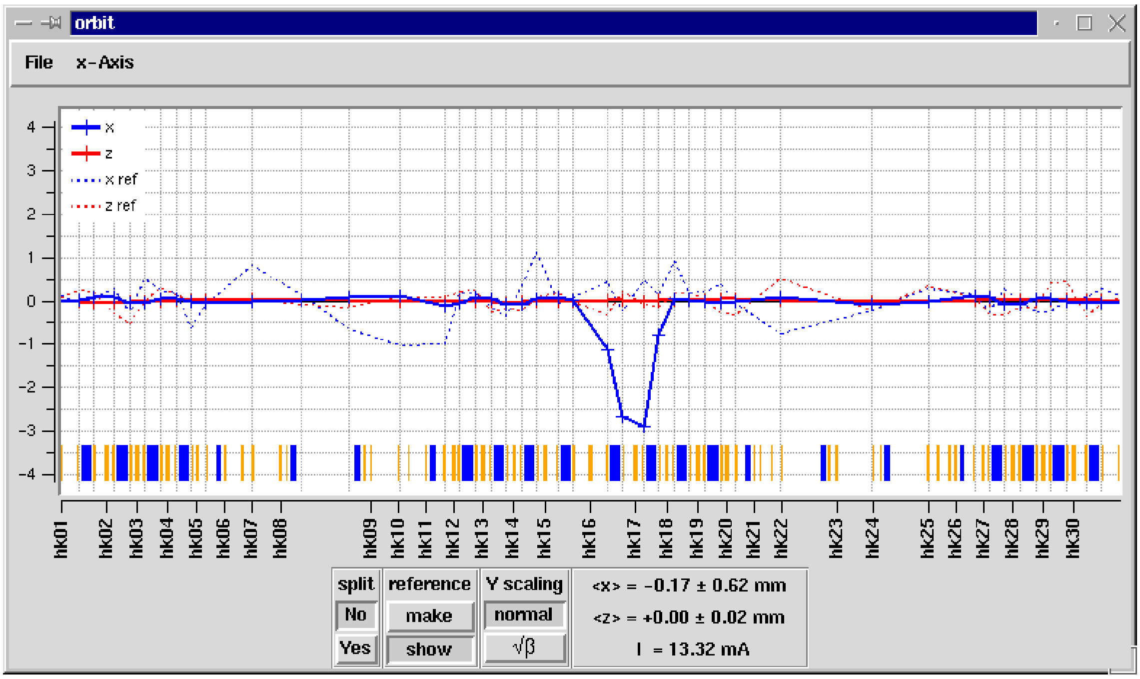


Abbildung 7.22: *Durch Korrektur der Hochfrequenz abgeschlossene Beule.*

7.7.4 Das SVD-Verfahren

Mit der Korrektur nach dem SVD-Verfahren (siehe Kapitel 3.2.7) konnten bislang leider keine guten Erfahrungen gemacht werden. Die Korrekturversuche haben mehrfach zu Strahlverlusten geführt.

Die Qualität der invertierten Matrix hängt stark vom Schwellwert δ und damit von der Anzahl der berücksichtigten Linearkombinationen von Response-Vektoren ab. Dieser Parameter muss bei jeder Matrix von Hand optimiert werden.

Abbildung 7.23 zeigt die invertierten Response-Matrizen der Low-Emittance-Optik. Der Schwellwert wurde so gewählt, dass die diagonale Bandstruktur der Matrix möglichst gut sichtbar wurde. Die Diagonalstruktur bedeutet praktisch, dass immer Korrektoren rund um einen BPM mit Orbitabweichung benutzt werden, um hier den Orbit mittels einer lokalen Beule zu korrigieren.

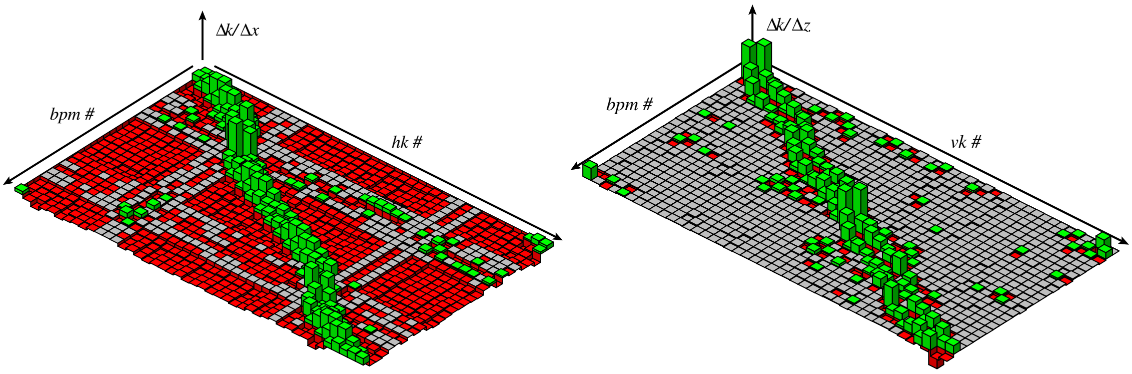


Abbildung 7.23: *SVD-invertierte horizontale (links) und vertikale (rechts) Orbit-Response-Matrix. Der Schwellwert beträgt 0.5 mm/mrad. Von hinten nach vorne links sind die Korrektoren aufgetragen, von hinten nach vorne rechts die BPMs.*

Der negative „Untergrund“ der horizontalen inversen Response-Matrix ist darauf zurückzuführen, dass der SVD-Algorithmus versucht, den durch die lokalen Beulen auf eine Dispersionsbahn verschobenen Orbit durch die restlichen Korrektoren wieder zu korrigieren.

Sowohl ein zu kleiner wie auch ein zu großer Schwellwert liefern schlechtere Ergebnisse, wie Abbildung 7.24 für die vertikale Response-Matrix zeigt. Bei zu kleiner Schwelle treten Querstreifen auf. Das bedeutet, es gibt Korrektoren, die immer verändert werden – gleichgültig, wo die Orbitabweichung auftritt. Bei zu großer Schwelle wird die Diagonale sehr breit. Das bedeutet, es werden immer sehr viele Korrektoren eingesetzt, um eine Orbitabweichung zu korrigieren.

7.7.5 Die 3°- und 7°-Dipolmagnete

Es ist aufgefallen, dass bei gut korrigiertem Orbit bestimmte Korrektoren stark negative Werte eingestellt hatten. Die horizontalen Korrekturmagnete hk06, hk11, hk21 und hk26

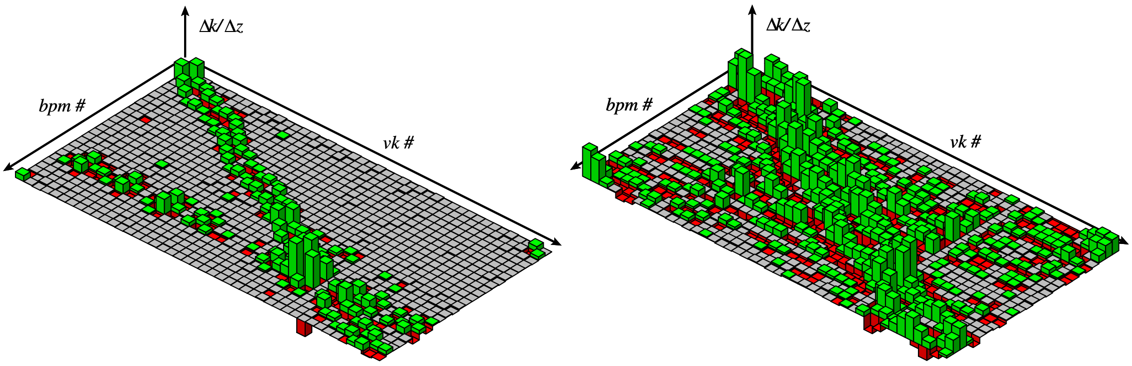


Abbildung 7.24: *SVD-invertierte vertikale Orbit-Response-Matrix mit zu kleinem (links, 0.2 mm/mrad) und zu großem (rechts, 2.0 mm/mrad) Schwellwert.*

wurden durch die Orbitkorrektur auf Ströme zwischen -6 A und -10 A gesetzt, wobei ± 10 A das Limit der Korrektornetzgeräte ist.

Diese vier Korrektoren sind symmetrisch zueinander angeordnet und befinden sich jeweils unmittelbar neben einem 7°-Dipol. Dadurch lag die Vermutung nahe, dass die 7°-Dipole eine zu geringe Ablenkstärke hatten. Eine Erklärung mag das im Vergleich zu den längeren 20°-Dipolen unterschiedliche Sättigungsverhalten dieser Magnete sein. Unterlagen über eine Vermessung des Feldes und der Sättigung liegen für die kurzen Dipole nicht vor. Der Aufbau und die Bestromung dieser Magnete sind in Kapitel 4.3 beschrieben.

Der Dipolstrom durch die 2°-Windungen wurde bei laufender Orbitkorrektur um 5.5% erhöht. Skaliert auf den gesamten 7°-Dipol entspricht das einer Verstärkung des Feldes um 1.6%. Die Stromstärken aller vier Korrektoren haben sich dabei um etwa 50% verringert. Der Orbit blieb währenddessen stabil bei ± 0.28 mm um den Referenzorbit. Die erneute Injektion in den Speicherring verlief problemlos.

Für den weiteren Betrieb des Speicherringes wurde diese empirisch gefundene Einstellung übernommen. Ein ähnliche Häufung starker gleichgerichteter Korrektorstärken in der Nähe der 3°-Dipole konnte nicht festgestellt werden.

7.7.6 Schlussfolgerung

Die globalen „bester Korrektor“-Methoden haben sich im täglichen Betrieb sehr gut bewährt. Die Orbitlage in den Insertion Devices und die Injektion konnten konstant gehalten werden. Dies ist mit dem SVD-Verfahren bislang nicht gelungen. Für den Standardbetrieb sollten daher bis auf weiteres die „bester Korrektor“-Methoden benutzt werden. Die Möglichkeit der Hochfrequenz-Korrektur zur Beseitigung der durchschnittlichen horizontalen Orbitablage sollte genutzt werden, um Dispersionsorbits zu vermeiden.

Die Implementierung eines verlässlichen Korrekturalgorithmus auf der Basis des SVD-Verfahrens bei Delta bedarf noch weiterer Anstrengungen. Aufgrund der Zuverlässigkeit der „bester Korrektor“-Methoden besteht dazu momentan jedoch kein Anlass.

Die lokalen Orbitbeulen haben sich zur Justierung der Strahllage an einzelnen Punkten, wie in den Insertion Devices bewährt. Sie sollten aber nicht zur globalen Orbitkorrektur verwendet werden.

Die Korrektur der 3°- und 7°-Dipolmagnete kann bei Bedarf manuell durchgeführt werden, wenn die Orbitkorrektur aktiv ist. Wurde für diese Magnete empirisch ein guter Wert gefunden, besteht keine Notwendigkeit, diese Magnete in eine automatisierte Korrektur einzubinden.

Kapitel 8

Ausblick

Während der Erstellung dieser Arbeit sind einige Punkte aufgefallen, in denen für die Zukunft noch weiteres Entwicklungspotenzial liegt. Zum Teil ist deren Verwirklichung jedoch mit erheblichem technischen Aufwand verbunden.

8.1 Positionen der Strahllagemonitore

Die derzeit in Delta eingebauten Strahllagemonitore decken an einigen Punkten nicht optimal den Informationsbedarf über die Orbitlage.

Um den Verlauf des Orbits in horizontaler Orientierung besser erfassen zu können, sind einerseits Strahllagemonitore in den horizontal fokussieren Quadrupolen wünschenswert. Es gibt dafür mehrere Gründe:

- Hier befinden sich die Maxima sowohl der horizontalen Betafunktion wie auch der Dispersionsfunktion. Die Empfindlichkeit der BPMs auf horizontale Orbitverschiebungen wäre hier doppelt so hoch.
- Insbesondere im Quadrupol unmittelbar hinter der Injektionsstelle wäre die Möglichkeit, die Orbitlage zu erfassen, zur Optimierung der Injektionseffizienz sehr nützlich.
- Mit einem Strahllagemonitor in der Mitte eines Quadrupoltripletts könnten transversale Verschiebungen der drei Quadrupole gegeneinander anhand des Orbitverlaufs erkannt werden.

Im Sinne eines reproduzierbaren Nutzerbetriebs muss andererseits die Strahllage an den Quellpunkten der Synchrotronstrahlung erfasst werden können. Dazu sind Strahllagemonitore unmittelbar vor und hinter den Insertion Devices unbedingt notwendig. Derzeit befinden sich beim supraleitenden Wiggler und beim U55-Undulator Quadrupole zwischen BPMs und Insertion Device. Diese können den Strahl so ablenken, dass trotz konstanter BPM-Anzeigen der Orbit im Insertion Device nicht reproduzierbar ist.

Der Einbau neuer Strahllagemonitore ist allerdings mit aufwändigen Arbeiten am Vakuumsystem der Maschine verbunden. Es müssten neue Kammerabschnitte gefertigt und im gesamten Speicherring das Vakuum gebrochen werden. Mit etwas weniger Aufwand könnten zumindest an den wichtigsten Stellen neue BPMs eingebaut werden: an der Injektionsstelle und um die Insertion Devices.

8.2 Schnelles Orbit-Feedback

Mit dem momentanen Korrektorsystem ist eine Orbitkorrektur nicht schneller als mit wenigen Hertz möglich. Sowohl die komplizierte Schnittstelle der Korrekturnetzgeräte wie auch die Verzögerungen von 0.1 Sekunden, mit der sie auf Sollwertänderungen reagieren, lassen keine schnellere Änderung der Korrekturmagnete zu.

Ein schnelles Feedback ist nur zur Stabilisierung der Strahllage in den Insertion Devices wirklich sinnvoll. Da aber in Delta zur Zeit, im Gegensatz zu vielen anderen Maschinen, nur drei Insertion Devices installiert sind, ist dort jeweils ein lokales Feedbacksystem aus zwei schnellen Korrekturmagneten für jede Orientierung ausreichend.

Bei Umgehung des Tiefpasses der BPM-Elektronik lassen sich noch Strahlschwingungen bis etwa 600 Hertz erkennen. Sie können also auch von einem schnellen Feedback benutzt werden. Zur Auslese der BPMs, Verarbeitung der Daten in Echtzeit und Steuerung der schnellen Korrektoren sollte ein DSP[1]-System genutzt werden, wie es mittlerweile im Booster BoDo eingesetzt wird [24].

8.3 Weiterentwicklung der Optik-Modelle

Die Messung der Orbit-Response-Matrizen stellt ein geeignetes Hilfsmittel zur Entwicklung verbesserter Optik-Modelle dar. Durch Variation verschiedener Parameter, wie zum Beispiel Fehlaufstellungen der Magnete oder Feldfehler, kann das theoretische Modell soweit angepasst werden, dass die tatsächlich gemessenen Orbit-Response-Matrizen mit den vom Modell vorhergesagten übereinstimmen [7].

Durch Anwendung dieser Parameter auf andere Optiken, das bedeutet andere Einstellungen der Quadrupolmagnete und damit andere Betafunktionen, Dispersionsfunktionen und Arbeitspunkte, können die Modelle wiederum durch Vergleich der Orbit-Response-Matrizen getestet werden.

Besonders zu empfehlen sind hier Optiken, deren horizontaler Arbeitspunkt, im Gegensatz zur momentanen Standardoptik von Delta, nicht in der Nähe von 9 liegt, wenngleich auch derartige Optiken für den Nutzerbetrieb nicht sinnvoll sind.[2]

Der jetzige Arbeitspunkt hat in Kombination mit den bei Delta verwendeten 20°-Ablenkdipolen einen gravierenden Nachteil für Tests der Optikmodelle:

[1] Digitaler Signal-Prozessor

[2] Bei schwächerer Fokussierung vergrößert sich der Quellpunkt der Synchrotronstrahlung.

Der Phasenvorschub der Betatronschwingung beträgt von der Mitte eines Quadrupoltripletts über einen Dipol bis zur Mitte des nächsten Tripletts etwa π. (Der Anteil von 20/360 des Kreisbogens an $2\pi Q$ Betatronschwingungen).

Da die horizontale Betafunktion ihre Minima in den Dipolen erreicht und der Phasenvorschub nach Gleichung (2.4) proportional zur reziproken Betafunktion ist, entfällt der größte Teil des horizontalen Phasenvorschubs auf das Innere der Dipole. Die beiden BPMs am Anfang und am Ende eines jeden Tripletts sind damit fast auf derselben Phase und fast π von den nächsten beiden BPMs entfernt. Dadurch lässt sich die horizontale Betatronschwingung nur schlecht messen. Ideal wären BPMs im Phasenabstand von höchstens $\pi/2$.

Kapitel 9

Zusammenfassung

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Korrektur der Strahllage in Delta ohne ein theoretisches Optikmodell auf der Grundlage gemessener Daten möglich und sinnvoll ist. Insbesondere konnte die Orbitdrift, welche durch die transversale Verschiebung von Quadrupolen aufgrund der Erwärmung der Vakuumkammer verursacht wird, sowie die Drift durch den ungleichmäßigen Feldverlust des supraleitenden Wigglers erfolgreich unterdrückt werden.

Verschiedene Algorithmen zur Orbitkorrektur wurden implementiert und getestet, wobei sich die „bester Korrektor“-Methoden gegenüber den lokalen Orbitbeulen und dem SVD-Verfahren als besonders stabil erwiesen haben.

Im Zuge der Umstellung des Kontrollsystems auf EPICS wurden verschiedene Treiberprogramme entwickelt, die für die Ansteuerung der zur Orbitkorrektur notwendigen Geräte zum Einsatz kommen und darüber hinaus von anderen Beschleunigern übernommen wurden. Es wurden Mess- und Steuerungsprogramme mit grafischer Benutzeroberfläche entwickelt, die nicht nur für diese Arbeit notwendig waren, sondern im täglichen Betrieb des Beschleunigers mittlerweile unverzichtbar sind.

Desweiteren konnten aufgrund der durch diese Arbeit zur Verfügung gestellten Diagnosemöglichkeiten Problempunkte bei Delta gefunden und beseitigt werden. So wurde anhand der durch das Orbitkorrekturprogramm eingestellten Ablenkwinkel der Korrektoren empirisch eine bessere Einstellung für die 7°-Dipolmagnete ermittelt.

Die Programme zur Steuerung lokaler Orbitbeulen und zur Messung der Orbit-Response-Matrix finden auch Anwendung als Hilfsmittel zur strahlbasierten Kalibrierung der Strahllagemonitore und zur Verbesserung des theoretischen Optikmodells. Damit bildet diese Arbeit die Grundlage für weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der Orbitstabilisierung und Charakterisierung der Optik bei DELTA.

Anhang A

Befehlssatz der Korrekturnetzgeräte

Die bei Delta verwendeten Netzgeräte für die Korrekturspulen werden über einen Satz von 1-Byte Befehlen angesprochen. Einige von ihnen geben eine 1-Byte Antwort zurück. Die Kommunikation erfolgt über eine serielle 20 mA-Schnittstelle mit einer Übertragungsrate von 19.2 kBaud, 8 Datenbits, 1 Stoppbit, ohne Parität [25].

Befehl	Byte-Code	Bedeutung	Antwort
DOWN	0x01	DAC erniedrigen	-
UP	0x11	DAC erhöhen	-
SETH	0x02	DAC lesen (Highbyte)	HIGH(DAC)
SETL	0x03	DAC lesen (Lowbyte)	LOW(DAC)
ACTH	0x04	ADC lesen(Highbyte)	HIGH(ADC)
ACTL	0x05	ADC lesen(Lowbyte)	LOW(ADC)
STAT	0x06	Status lesen	STATUS
PON	0x17	Power ON	-
POFF	0x27	Power OFF	-
POLN	0x18	Polwender Negativ	-
POLP	0x28	Polwender Positiv	-
CLR	0x19	DAC löschen	-
RCLR	0x29	Reset DAC löschen	-
CON	0x1A	ADC Wandlung	-
RCON	0x2A	Reset ADC Wandlung	-

Tabelle A.1: *Befehle der Korrektornetzgeräte*

Die Befehle PON und POFF schalten den Leistungsteil ein und aus. Beim Einschalten wird automatisch der DAC gelöscht. Zum expliziten Löschen des DAC wird der Befehl CLR benutzt. Das Löschsignal muss mittels RCLR wieder zurückgesetzt werden.

Um den aktuellen Strom zu lesen, muss zuerst mittels des Befehls CON ein Wandlungszyklus des ADC gestartet werden. Auch dieses Signal muss mit RCON wieder zurückgesetzt werden. Danach kann mit ACTL und ACTH der ADC ausgelesen werden. Im resultierenden 16-Bit Wert enthalten die unteren 12 Bit den (unipolaren) ADC Wert und das höchstwertige Bit den Istzustand des Polwenders. Ein gesetztes Bit steht dabei für positive Polarität. Für einen einzigen Lesevorgang müssen also vier Befehle übermittelt und zwei Antworten empfangen werden. Der Empfang einer Antwort kann bis zu 100 ms dauern.

Um einen Sollwert zu setzen, muss der DAC mittels der Befehle UP und DOWN schrittweise um 1 erhöht oder erniedrigt werden. Ein direktes Setzen ist nicht möglich. Soll sich die Stromrichtung ändern, so ist der DAC zuerst durch DOWN Befehle auf 0 zu bringen, dann mittels POLN oder POLP der Polwender einzustellen und danach der Strom durch UP Befehle auf den gewünschten Wert zu setzen. Eine Umpolung unter Last sollte unterbleiben, da dies den Polwender zerstören kann. Die Anzahl der zu übermittelnden Befehle ist damit proportional zur Stromdifferenz.

Der aktuelle Wert des DAC lässt sich mittels der Befehle SETL und SETH auslesen. Setzt man die beiden Antwortbytes zu einem 16-Bit Wert zusammen, erhält man in den unteren 12 Bit den (unipolaren) DAC-Wert und im höchstwertigen Bit den Sollzustand des Polwenders.

Der Befehl STAT liest ein Statusbyte, welches Informationen über den Schaltzustand, die Polarität und eventuell aufgetretene Fehler enthält, darunter auch eine Warnung vor Überhitzung des Gerätes und eine Überspannungsanzeige.

Anhang B

StreamDevice Treiber

Der sogenannte StreamDevice Treiber wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, um Geräte anzusprechen, die über einen Strom (engl. stream) von Zeichen kommunizieren. Das schließt Geräte mit GPIB-Schnittstelle oder serieller RS232-Schnittstelle ein, sowie auch einige Geräte mit CAN-Bus-Schnittstelle. Die unterschiedlichen Funktionen der verschiedenen Geräte müssen mit unterschiedlichen Zeichenketten angesprochen werden. Um größtmögliche Flexibilität zu gewährleisten, sind die zu übertragenen Zeichenketten frei konfigurierbar.

Damit der Programmieraufwand bei Erweiterungen des Treibers auf neue Recordtypen und andere Busarchitekturen möglichst gering bleibt, wurde ein modulares Design gewählt. Der Kern des Treibers enthält alle busunabhängigen und gemeinsam genutzten Funktionen. Dazu gehören unter anderem die Formatierung von auszugebenden Zeichenketten, das Erkennen von eingelesenen Zeichenketten sowie die Verwaltung der Buszugriffe. Abbildung B.1 zeigt schematisch den modularen Aufbau des Treibers.

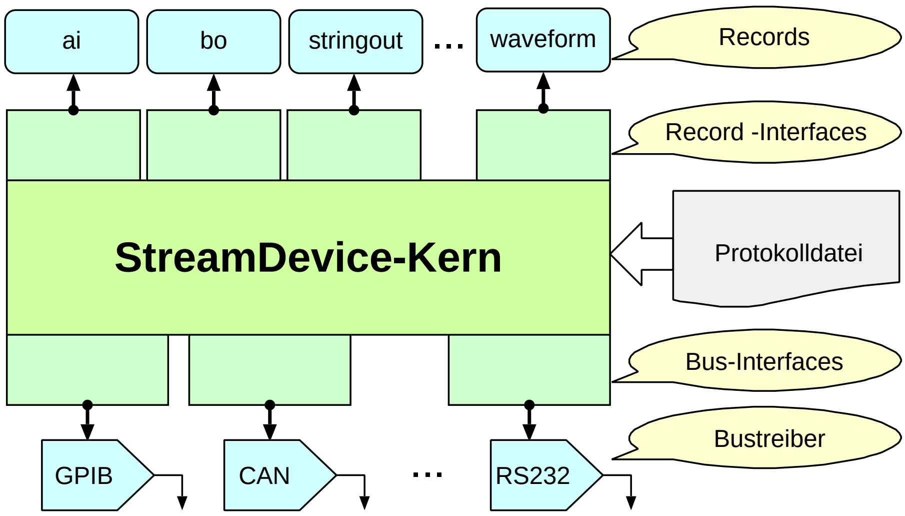


Abbildung B.1: *Schematischer Aufbau des StreamDevice-Treibers mit modularen Interfaces zu Records und Bustreibern.*

Die Verbindung zu den verschiedenen Recordtypen und Bustreibern wird durch eine Interfaceschicht gebildet, die nur wenig Programmcode enthält. Um den Treiber an neue Recordtypen oder Bustreiber anzupassen, genügt es, ein neues Interface zu schreiben. Der Kern des Treibers bleibt dabei unverändert.

Die Anpassung an einen neuen Gerätetyp geschieht ohne jede Neuprogrammierung des Treibers. Stattdessen muss lediglich eine sogenannte Protokolldatei erstellt werden, die für jede Funktion des Gerätes das Protokoll, das heißt die zu übertragenden Zeichen beschreibt. Außerdem enthält diese Datei auch Parameter wie Terminatoren und Timeouts.

Es folgt ein Beispiel einer Protokolldatei für das 3°-Dipol-Netzgerät:

```
# Danfysik-8000
OutTerminator = LF;
InTerminator = LF CR;
ReplyTimeout = 2000; # milliseconds
ReadTimeout = 500;
command { out "%s"; }
info { out "%s"; in "%39c"; }
current { out "AD 8"; in "%d"; }  # 1E-3 A
current.set { out "WA %05d"; }    # 1E-3 A
current.rb { out "RA"; in "%d"; } # 1E-4 A
```

Für jede anzusprechende Funktion des Geräts gibt es ein Protokoll. Dieses besteht aus einem Namen und einer Sequenz von Befehlen in geschweiften Klammern. Jeder Befehl wird durch ein Semikolon abgeschlossen. Es gibt nur vier verschiedene Befehle:

`out`	Ausgabe von Zeichen
`in`	Lesen von Zeichen
`wait`	Wartezeit
`event`	Reaktion auf ein Ereignis vom Gerät

Die Befehle `out` und `in` haben als Argument jeweils eine Zeichenkette, die an das Gerät gesendet bzw. vom Gerät erwartet wird. In diesen Zeichenketten können Platzhalter vorkommen, die durch formatierte Werte ersetzt werden. Viele Protokolle bestehen nur aus diesen beiden Befehlen.

Die Platzhalter haben eine %-Notation, die an die Befehle `printf` und `scanf` aus der Programmiersprache C [26] angelehnt ist. Zusätzlich zu den in C definierten Formaten für ganze Zahlen (%i, %d, %u, %o, %x, %X), reelle Zahlen (%f, %e, %E, %g, %G) und Zeichen (%c, %s, %[...]) werden weitere Formate unterstützt, die von manchen Geräten benötigt werden:

%b	binary – ganze Zahl in ASCII-Darstellung zur Basis 2 (Zeichen 0 und 1)
%D	BCD – ganze Zahl in BCD-Darstellung (binary coded decimal)
%r	raw – ganze Zahl in Zweierkomplement-Darstellung
%{...|...}	alternative Zeichenketten (enumerations)

Im Gegensatz zur Programmiersprache C gibt man keine Variable an, aus welcher der Wert gelesen, bzw. in welche der Wert geschrieben wird. Es ist die Aufgabe des Record-Interfaces, hierfür ein geeignetes Feld des Records zu wählen (normalerweise das Feld VAL oder RVAL).

Die konstanten Zeichenketten können entweder aus ASCII-Text in Anführungsstrichen bestehen oder in Form von Zahlen von 0 bis 255 als einzelne Bytes angegeben werden. Auch eine Mischung beider Formate ist erlaubt.

Bei der Ausgabe wird an jede Zeichenkette der Terminator angehängt. Bei der Eingabe dient der Terminator der Endeerkennung. Er wird aber vor der Auswertung entfernt. Es können für Eingabe und Ausgabe auch verschiedene Terminatoren definiert werden. Üblich sind „carriage return" (CR), „linefeed" (LF) oder die Kombinationen CR LF und LF CR. Es sind aber auch andere Zeichen und Zeichenkombinationen möglich.

Der Befehl `wait` hat als Argument eine Wartezeit in Millisekunden. Damit kann man dem Gerät zusätzliche Zeit zwischen zwei anderen Befehlen geben. Der Befehl `event` wartet auf ein vom Gerät ausgelöstes Ereignis. Wie dieses beschaffen ist, ist abhängig vom verwendeten Feldbus. Die Erkennung des Ereignisses ist, wie auch die Ausgabe der formatierten Zeichenketten und das Lesen der Gerätemeldungen, Sache des Bustreibers bzw. des Bus-Interfaces. Der Befehl hat als Argument eine maximale Wartezeit, nach der abgebrochen wird.

Die Anbindung an EPICS erfolgt, indem im Linkfeld OUT oder INP des Records der Name der Protokolldatei, der Name eines Protokolls und der zu verwendende Bus angegeben wird.

Beispiel: Die Stromrücklese der Delta-3°-Dipole:

```
record (ai, "de-b3-i") {
    field (DTYP, "stream")
    field (INP,  "@Danfysik-8000 current can1 0x104 0x105")
    field (EGUF, "500")
    ...
}
```

Weitere Informationen zum StreamDevice-Treiber lassen sich der Dokumentation im Internet [27] entnehmen.

Literaturverzeichnis

[1] K. WILLE, *Physik der Teichenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, Teubner Studienbücher, 1992

[2] M. SANDS, *The Physics of Electron Storage Rings. An Introduction.* Proceedings of the International School of Physics *Enrico Fermi*, Editor B. Touscheck, 1971

[3] H. WIEDEMANN, *Particle Accelerator Physics*, Springer Verlag, 1993

[4] G. SCHMIDT, et al, *Position Sensors for Monitoring Accelerator Magnet Motion at DELTA*, EPAC 2002

[5] W. H. PRESS, et al, *Numerical Recipes in C: The art of Scientific Computing. Second Edition.* Cambridge University Press

[6] A. JANKOWIAK, *Strahldiagnose und Closed-Orbit-Charakterisierung mit HF-Strahllagemonitoren am Beispiel der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA*, Dissertation, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, 1999

[7] M. GREWE, Dissertation, (noch nicht veröffentlicht)

[8] M. GREWE, et al, *Beam Based Machine Modelling for Orbit Control and Feedback at DELTA*, EPAC 2002

[9] ESD, *CAN-CAI812 Handbuch*, Electronic System Design GmbH Hannover, 1994

[10] ESD, *CAN-CCOM4 Handbuch*, Electronic System Design GmbH Hannover, 1994

[11] S. A. LEWIS, *Recommended EPICS Documentation*, `http://csg.lbl.gov/EPICS/RecommendedDocs.html`

[12] L. R. DALESIO, et al, *EPICS Architecture*, Los Alamos National Laboratory, Argonne National Laboratory, 1993

[13] S. A. LEWIS, *Overview of the Experimental Physics and Industrial Control System: EPICS*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000

[14] P. STANLEY, et al, *EPICS Record Reference Manual*, The University of California, The University of Chicago, 1995

[15] ESD, *VME-CAN2 Software Handbuch*, Electronic System Design GmbH Hannover, 1994

[16] D. ZIMOCH, *Stream Device Driver*, EPICS Collaboration Meeting, ICALEPCS 2001

[17] P. CHEVTSOV, et al, *Information-Control Software for Handling Serial Devices in an EPICS Environment*, ICALEPCS 2001

[18] P. OWENS, *Serial Support for Diamond*, EPICS Collaboration Meeting, Mai 2002

[19] B. WELCH, *Praktisches Programmieren in Tcl und Tk*, Prentice Hall Verlag GmbH, 1996

[20] TWK, *Induktive Wegaufnehmer, Modellreihe IW 150*, TWK-Elektronik GmbH Düsseldorf, 1996

[21] H. GROTE, F. C. ISELIN, *The MAD Program (Methodical Accelerator Design), Version 8.19, User's Reference Manual*, CERN, 1996

[22] T. ROY, *Optimierung des DELTA-Speicherrings für den Betrieb des neuen supraleitenden Wigglers*, Diplomarbeit, Institut für Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung, Universität Dortmund, 1999

[23] ACCEL, *Betriebshandbuch für den 5T supraleitenden asymmetrischen Wiggler* (für den internen Gebrauch bei DELTA), ACCEL Instruments GmbH

[24] B. KEIL, Dissertation, (noch nicht veröffentlicht)

[25] VILCINS, *Serielle Schnittstelle für die Korrekturnetzgeräte (HERA-e^--Ring)*, DESY, 1989

[26] B. W. KERNIGHAM, D. M. RITCHIE, *The C Programming Language, Second Edition*, Prentice Hall, Inc., 1988

[27] D. ZIMOCH, *Stream Device*, `http://www.delta.uni-dortmund.de/controls/pub/streamDevice/streamdevice.html`

Dank

Ich möchte mich bei meinen Eltern dafür bedanken, dass sie mein Interesse an der Wissenschaft stets gefördert und mich während meines Studiums unterstützt haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei Professor Dr. Wille für die Möglichkeit, unter seiner Betreuung an DELTA zu promovieren.

Auch möchte ich allen Mitarbeitern und ehemaligen Mitarbeitern, die mich während meiner Zeit bei DELTA begleitet haben, für ihre gute Zusammenarbeit danken. Besonders erwähnen möchte ich hier meine Kollegen in der Kontrollgruppe, Dr. Detlev Schirmer, Elke Kasel und Boris Keil.

Für vielfältige Diskussionen und Anregungen bedanke ich mich vor allem bei Elke Kasel und Marc Grewe.