Dissertation zur Erlangung des Grades Dr. rer. nat.

Iterativer Algorithmus zur strahlbasierten Vermessung und Korrektur von Magnetfehlaufstellungen am Speicherring Delta

auf Basis eines erweiterten Modells der Strahloptik

Dipl. Phys. Olaf Kopitetzki

01. September 2009

Angefertigt an der Fakultät Physik der TU Dortmund
Für meine Familie.

1. Gutachter: Prof. Dr. Klaus Wille
Lehrstuhl für Beschleunigerphysik
Technische Universität Dortmund

2. Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Spaan
Lehrstuhl für experimentelle Physik V
Technische Universität Dortmund

Vertreter der wiss. Mitarbeiter: Dr. Christian Sternemann
Lehrstuhl für experimentelle Physik I
Technische Universität Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 30.10.2009
# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung ........................................... 1

2. Die Synchrotronstrahlungsquelle DELTA ........ 3
   2.1. Aufbau der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA ............ 3
   2.2. Erzeugung und Nutzung der Synchrotronstrahlung ............ 4

3. Grundlagen der Strahlführung ..................... 7
   3.1. Bewegung geladener Teilchen in magnetischen Feldern ........ 7
   3.2. Bewegungsgleichung .................................. 9
      3.2.1. Betatronschwingungen ................................ 9
      3.2.2. Dispersion ........................................ 11
      3.2.3. Strahlbreite ....................................... 11
      3.2.4. Emittanz .......................................... 12
      3.2.5. Arbeitspunkt und optische Resonanzen .................. 14
   3.3. Transformationsmatrizen .............................. 15

4. Elemente der Strahlführung ........................ 17
   4.1. Reale Magnete ..................................... 17
      4.1.1. Effektive Magnetlänge .............................. 17
      4.1.2. Integrale Multipolstärken ........................ 18
      4.1.3. Hysterese ........................................ 18
      4.1.4. Umrechnung von Magnetströmen in Magnetstärken .... 19
   4.2. Driftstrecken ....................................... 19
   4.3. Dipol-Magnete ..................................... 20
      4.3.1. Schwache Fokussierung .............................. 20
      4.3.2. Kantenfokussierung ................................ 21
      4.3.3. Sextupol-Komponenten der Dipol-Randfelder ............ 22
      4.3.4. Dipol-Störungen ................................... 22
      4.3.5. Berechnung der Strahlenergie ....................... 23
      4.3.6. Dipole in Delta .................................... 24
   4.4. Quadrupol-Magnete ................................ 25
      4.4.1. Quadrupol-Störungen und Beta-Beating ............... 27
      4.4.2. Quadrupole in Delta ................................ 29
         4.4.2.1. Tripplet-Struktur ............................... 29
         4.4.2.2. Mechanischer Aufbau .......................... 30
         4.4.2.3. Stromversorgung ................................ 33
   4.5. Sextupol-Magnete .................................. 35
      4.5.1. Chromatizität ...................................... 36
4.5.2. Probleme beim Einsatz von Sextupolen ........................................... 37
4.5.3. Sextupole in Delta ................................................................. 37
4.6. Vorzeichenkonventionen ................................................................. 39

5. Messung und Korrektur der Strahlage ................................................. 41
5.1. Strahllagemonitore ................................................................. 41
  5.1.1. Genauigkeit und Kalibrierung ............................................. 42
  5.1.2. BPM-Positionen ................................................................. 43
5.2. Dipol-Korrektormagnete ............................................................... 45
  5.2.1. Genauigkeit ................................................................. 45
  5.2.2. Sextupol-Komponenten der Korrektoren ................................ 46
  5.2.3. DC-Spulen ................................................................. 46
  5.2.4. Korrektorpositionen ............................................................... 47
5.3. Orbitkorrektur ................................................................. 48
  5.3.1. Response-Matrizen ............................................................... 48
  5.3.2. Lokale Orbitbeulen ............................................................... 49

6. Weitere Komponenten des Speicherrings ........................................... 53
6.1. Beschleunigungsstrecken ............................................................... 53
6.2. Insertion Devices ................................................................. 53
6.3. Vakuumkammer ................................................................. 55
  6.3.1. Fixierung der Vakuumkammer ............................................. 56
  6.3.2. Verschiebung der Vakuumkammer ............................................. 57
6.4. Induktive Wegaufnehmer ............................................................... 58
6.5. Geodätische Vermessung ............................................................... 59
6.6. Kontrollsystem ................................................................. 62

7. Modellierung des Speicherrings ....................................................... 65
7.1. MAD-Modell ................................................................. 65
7.2. Implementation in MATLAB ....................................................... 66
  7.2.1. Teilchentracking ............................................................... 67
  7.2.2. Funktionale Erweiterungen ................................................. 69
    7.2.2.1. Schnittstellen ............................................................... 69
    7.2.2.2. Vermessungsdaten ............................................................... 70
    7.2.2.3. Multipolkomponenten ............................................................... 72
7.3. Ergebnisse der Simulation ....................................................... 75
  7.3.1. Berücksichtigung der transversalen Positionsabweichungen ......... 76
  7.3.2. Annäherung im linearen Grenzfall ............................................. 76
  7.3.3. Einfluss der Sextupol-Komponenten der Dipol-Korrektoren ............ 81
  7.3.4. Response-Vektoren ............................................................... 82
  7.3.5. Feld- und Positionsfehler ............................................................... 84

8. Strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen ............... 89
8.1. Vorteile der strahlbasierten Messung ............................................. 89
8.2. Messmethode ................................................................. 90
Inhaltsverzeichnis

8.3. Fehlerbetrachtung .................................................. 96
  8.3.1. Fehlerquellen bei der Messung ................................. 96
  8.3.2. Fehlerquellen bei der Berechnung ............................. 99
    8.3.2.1. Genauigkeit des Modells ................................ 99
    8.3.2.2. Genauigkeit des Minimierungsalgorithmus ............... 100

8.4. Iterative Anwendung der Methode .................................. 100

8.5. Probleme beim Verschieben der Quadrupol-Magnete .................. 102

8.6. Ergebnisse der strahlbasierten Messung ............................ 102
  8.6.1. qd01+04 (äußerer Quadrupol) ................................. 102
  8.6.2. qd04+06 (äußerer) und qf03+03 (mittlerer Quadrupol) ........ 104
  8.6.3. qd04+11 (äußerer Quadrupol) .................................. 105
  8.6.4. Entlastung der Korrektoren ................................... 106

9. Messung der BPM-Positionen ............................................ 109
  9.1. System zur dynamischen Änderung der BPM-Offsets ............... 109
    9.1.1. Halterungen .................................................... 109
    9.1.2. Elektronik ...................................................... 111
  9.2. Genauigkeit des Wegaufnehmersystems ............................. 112

10. Zusammenfassung und Ausblick ........................................ 117

A. Anhang .......................................................................... 119
  A.1. Magnetstruktur des Speicherrings Delta ......................... 119
  A.2. Ergebnisse der geodätischen Vermessung ........................ 124

Abbildungsverzeichnis ...................................................... 127

Tabellenverzeichnis ......................................................... 129

Literaturverzeichnis ......................................................... 131

Danksagung ....................................................................... 141
1. Einleitung

Die Dortmunder Elektronen-Speicherringanlage DELTA ist eine Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation, die sich am Zentrum für Synchrotronstrahlung der Technischen Universität Dortmund befindet [9]. In ihr werden Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, um anschließend über mehrere Stunden in einem Speicherring umzulaufen. Bei den zur Einhaltung dieser ringförmigen Bahn notwendigen Ablenkungen emittieren die Elektronen Synchrotronstrahlung (siehe Kapitel 2.2). Neben der Bereitstellung der Synchrotronstrahlung für die Nutzer der Fakultät Physik der TU Dortmund und verschiedene externe Nutzer dient die Beschleunigeranlage der Ausbildung und Forschung im Bereich der Beschleunigerphysik.

Ziel dieser Arbeit

Zur Bereitstellung der Synchrotronstrahlung für die verschiedenen Nutzer ist es unerlässlich, den Elektronenstrahl an den Quellpunkten der Synchrotronstrahlung mit genau definierten Ablagen und Winkeln zu positionieren. Hierfür steht das in Kapitel 5.3 näher erläuterte Orbitkorrektursystem zur Verfügung, welches die Einstellung und Konstanthaltung dieser Parameter während des Speicherbetriebes ermöglicht. Das Orbitkorrektursystem bedient sich der in Kapitel 5 beschriebenen Dipol-Korrektormagnete, um die Strahlablagen lokal zu beeinflussen.


1Dies sind im Wesentlichen die Bergische Universität Wuppertal, das Institute for Analytical Sciences (ISAS), die Universität Siegen und das Forschungszentrum Jülich.
1. Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine neue Methode entwickelt, um die relativen Fehlaufstellungen der Quadrupol-Magnete strahlbasiert zu messen [32]. Damit wird eine iterative Korrektur der Fehlaufstellungen innerhalb der Quadrupol-Tripletts (siehe Kapitel 4.4) ermöglicht, die im Endeffekt zu einer Minimierung der erforderlichen Dipol-Korrektorstärken führen kann.

Es wird gezeigt, dass mit der neuen Methode eine iterative Korrektur der Quadrupol-Fehlaufstellungen mit einer Genauigkeit von besser als 100 µm möglich ist. Damit ist sie genauer als die bei DELTA angewandte geodätische Messmethode, die durch die mechanische Auflage der Messplatten auf den Eisenjochen limitiert ist, und hat zudem den Vorteil, dass keine geodätischen Instrumente benötigt werden. Die höhere Genauigkeit resultiert aus der Tatsache, dass durch die strahlbasierte Messung die Magnetpositionen auf die magnetischen Mitten der Quadrupole referenziert werden und nicht auf die Messplatten. Außerdem ist eine Vermessung der Magnete während des Strahlbetriebes möglich, während dessen sich die Magnetpositionen von denen im Zustand ohne Strahl unterscheiden [58].

Voraussetzung für die Anwendung der neuen Messmethode ist ein möglichst akkurates Modell des Speicherrings. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit umfangreiche Erweiterungen am Modell vorgenommen.

Aufbau der Arbeit


Die Anpassungen des Speicherringmodells werden in Kapitel 7 erläutert, bevor in Kapitel 8 die eigentliche Messmethode sowie deren Ergebnisse präsentiert werden.

Die zur Korrektur der Fehlaufstellungen notwendigen Umbaumaßnahmen erfordern die Einführung eines Positionsüberwachungssystems für die Strahllagemonitore (siehe Kapitel 5), welches in Kapitel 9 eingeführt wird. Kapitel 10 enthält schließlich einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse dieser Arbeit sowie einen Ausblick auf das weitere Vorgehen bei der Korrektur der Fehlaufstellungen im Speicherring Delta.
2. Die Synchrotronstrahlungsquelle DELTA

2.1. Aufbau der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA

Der prinzipielle Aufbau der Beschleunigeranlage ist Abbildung 2.1 zu entnehmen. Die Elektronen bewegen sich innerhalb des Strahlrohres (siehe Kapitel 6.3) im Ultraschallvakuum. Nach der Extraktion aus einer thermischen Elektronenquelle (Gun) besitzen die Elektronen eine Energie von etwa 50 keV und werden anschließend in einer normalleitenden 3-GHz-Linearbeschleunigersektion auf etwa 75 MeV beschleunigt, bevor sie durch einen Transferkanal in das Booster-Synchrotron BoDo überführt werden. Während einer zyklischen Rampe erreichen sie dort eine Endenergie von bis zu 1.5 GeV, mit der sie dann in den Speicherring Delta transferiert werden. Dieser Zyklus\(^1\) wird wiederholt, bis in Delta ein maximaler Strahlstrom von etwa 130 mA akkumuliert ist.

![Abbildung 2.1: Übersicht der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA. Zur Beschreibung der einzelnen Komponenten siehe Text.](image)

\(^1\)Die gesamte Zyklusdauer ist abhängig von der Endenergie und beträgt bei 1.5 GeV 6.5 s.
2. Die Synchrotronstrahlungsquelle DELTA

Durch die Abstrahlung der Synchrotronstrahlung erfahren die Elektronen einen Energieverlust, der ihnen in einer Beschleunigungsstrecke wieder zugeführt werden muss. Diese Beschleunigungsstrecke ist durch einen Hohlraumresonator (Cavity) verwirklicht (siehe Kapitel 6.1).

2.2. Erzeugung und Nutzung der Synchrotronstrahlung

Eigenschaften der Synchrotronstrahlung

Hochrelativistische geladene Teilchen emittieren bei transversaler Beschleunigung, beispielsweise in den Ablenkmagneten eines Speicherrings, elektromagnetische Strahlung tangential zur Bewegungsrichtung, die als Synchrotronstrahlung bezeichnet wird. Synchrotronstrahlung zeichnet sich durch eine hohe Intensität und Brillanz aus, wobei ihr Spektrum einen weiten Bereich abdeckt. Es reicht von der Infrarotstrahlung (IR) (von etwa $10^{-3}$ eV bis etwa 0.1 eV) über das sichtbare Licht (bis etwa 1 eV), den Vakuum-Ultraviolettbereich (VUV) (bis wenige 10 eV) und die weiche Röntgenstrahlung (bis etwa 2 keV) bis hin zur harten Röntgenstrahlung (bis zu einigen 10 keV). Aufgrund dieser Eigenschaften, aber auch wegen der genauen Zeitauflösung und der Polarisation [76], bietet sich Synchrotronstrahlung zur Untersuchung festkörperphysikalischer Problemstellungen an, beispielsweise bei der Oberflächen- und Kristallstrukturanalyse [10].

Erzeugung der Synchrotronstrahlung


Die Bezeichnung Synchrotronstrahlung leitet sich von ihrer Entdeckung an einer Synchrotron-Beschleunigeranlage ab. Diese hat ihren Namen aufgrund der Funktionsweise, bei der die Magnetfeldstärke synchron der Erhöhung der Teilchenenergie folgt.

Die Brillanz gibt die Zahl der pro Sekunde und Ampère Strahlstrom abgestrahlten Photonen in einem Spektralintervall von 0.1 % der Photonenergie pro mm² Quellgröße und mrad² Raumwinkel an. Diese entsteht durch das Bunchen des Strahls aufgrund der Phasenfokussierung, siehe [78].
2.2. Erzeugung und Nutzung der Synchrotronstrahlung

Nutzung der Synchrotronstrahlung

Die Synchrotronstrahlung wird den Experimentierplätzen über Strahllinien (Beamlines, BL) zugeführt (Abbildung 2.1) [56]. Diese bestehen aus einer Vakuumkammer, die mit der Strahlkammer verbunden ist, um die Synchrotronstrahlung geradlinig herauszuführen. Die Strahlung kann am Anfang der BL mit Hilfe eines mechanischen Verschlusses (Beamschutter) blockiert werden. Es folgen verschiedene Baugruppen, wie strahlungsdurchlässige Vakuumfenster zum Schutze des Speicherringvakuums, Blenden, Fokussierspiegel und Monochromatoren zur Beeinflussung der Strahlungseigenschaften wie Strahlgröße und -energie und schließlich der Halter für die zu untersuchenden Proben [9].

BL0 führt das Synchrotronlicht zur Nutzung des IR-Anteils aus der Kammer. BL1, BL2, BL6, BL7 und BL12 sind Strahllinien zur Nutzung der Synchrotronstrahlung der Dipol-Magnete, davon wird BL7 zur Strahldiagnose genutzt, indem das sichtbare Spektrum der Synchrotronstrahlung mit einem Spiegel ausgekoppelt und auf eine CCD-Kamera gelenkt wird. BL3 und BL4 sind die Strahllinien für das Laserlicht des FEL, während die spontane Undulatorstrahlung zur BL5 geführt wird. An BL8, BL9 und BL10 wird die harte Röntgenstrahlung des SAW genutzt. An BL12 wird die weiche Röntgenstrahlung des U55 herausgeführt.

Strahllebensdauer

Im Laufe der Zeit gehen immer mehr Elektronen durch verschiedene Effekte verloren, wobei die Restgasstreuung und der Touschek-Effekt dominieren [57, 72]. Die Restgasstreuung kann in die elastische Coulombstreuung und die durch inelastische Streuung erzeugte Bremsstrahlung aufgeteilt werden. In beiden Fällen streuen die Elektronen an in der Vakuumkammer befindlichen Gasmolekülen, die teilweise durch die Synchrotronstrahlung von der Oberfläche der Kammerwand desorbiert werden. Durch die elastische Streuung kann der Transversalimpuls der Elektronen so groß werden, dass sie auf die Kammerwand auftreffen und so verloren gehen.

Die inelastische Streuung kann dazu führen, dass die longitudinalen Impulse der Elektronen so groß werden, dass sie in den nichtlinearen Bereich der sinusförmigen Hochspannung im Cavity gelangen und schließlich keiner stabilen Umlaufbahn mehr folgen. Dieser Effekt kann bei hoher Dichte des Elektronenstrahls auch durch Streuung der Elektronen untereinander entstehen, wenn zwei Elektronen mit unterschiedlichen transversalen Impulsen aneinander stoßen. Dies wird als Touschek-Effekt bezeichnet [72]. Aufgrund dieser Effekte hat der gespeicherte Strahl nur eine begrenzte Lebensdauer, während derer die Stromstärke nähe-

5Die Elektronenenergie liegt dann nicht mehr innerhalb des phasenstabilen Bereichs und damit der Energieakzeptanz des Beschleunigers, siehe [78].
2. *Die Synchrotronstrahlungsquelle DELTA*

... rungsweise exponentiell abfällt. Bei einem Strahlstrom von 100 mA beträgt die Lebensdauer in Delta etwa 10 Stunden.
3. Grundlagen der Strahlführung

3.1. Bewegung geladener Teilchen in magnetischen Feldern

Geladene Teilchen, in diesem Fall Elektronen, werden innerhalb von Ringbeschleunigern wie BoDo und Speicherringen wie Delta auf einer vorgegebenen Bahn geführt, die im Folgenden als Designorbit bezeichnet wird. Diese Bahn setzt sich aus geraden Driftstrecken (siehe Kapitel 4.2) und Abschnitten mit konstant gekrümmtem Strahlverlauf mit dem Radius \( R \) zusammen [78]. Die Länge \( L \) des Designorbits beträgt für Delta 115.2 m.

Um die Elektronen auf gekrümmten Bahnen zu zwingen, muss die Lorentzkraft

\[
\vec{F} = \dot{\vec{p}} = e \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)
\]

aufgebracht werden (\( e \) bezeichnet hier die Ladung des Elektrons, \( \dot{\vec{p}} \) seinen Impuls und \( \vec{v} \) seine Geschwindigkeit, \( \vec{E} \) und \( \vec{B} \) sind die elektrische beziehungsweise die magnetische Feldstärke). Aufgrund der hochrelativistischen Geschwindigkeit der Elektronen würden zur Strahlführung elektrische Felder in Größenordnungen benötigt, die technisch eigentlich unmöglich wären [78]. Dagegen ist die Ablenkung mit magnetischen Feldern relativ einfach möglich; denn nach Gleichung 3.1 ist bei Teilchen nahe der Lichtgeschwindigkeit \( c \) ein elektrisches Feld der Stärke

\[
E = cB
\]

erforderlich, um eine dem magnetischen Feld äquivalente Ablenkung zu erreichen. Um die Wirkung einer magnetische Feldstärke von 1 T zu erreichen, müsste also eine elektrische Feldstärke von etwa 300 MV/m aufgebracht werden. Technisch realisierbar sind zur Zeit Feldgradienten von etwa 10 bis 20 MV/m [22] bei (ungepulsten) normalleitenden und 30 bis 40 MV/m [51] bei supraleitenden Beschleunigerstrukturen.

Um die vom Ladungsschwerpunkt der Elektronen beschriebene Bahn, den Orbit, zu charakterisieren, wird ein Koordinatensystem \((x, z, s)\) eingeführt, in dem die \( s \)-Koordinate in Bewegungsrichtung der Elektronen mitgeführt wird, während die \( x \)- und \( z \)-Koordinaten die transversale Abweichung vom Designorbit angeben (Abbildung 3.1). Die positive Richtung der horizontalen \( x \)-Koordinate zeigt bei einer horizontalen Anordnung der Magnetstruktur und einer Umlaufrichtung im Uhrzeigersinn nach außen, die positive Richtung der vertikalen \( z \)-Koordinate nach oben.
Abbildung 3.1: Koordinatensystem zur Beschreibung der Teilchenbahn [78].

Unter der Annahme, dass das magnetische Feld nur transversale Komponenten besitzt ($\vec{v} = (0, 0, v_s)$ und $\vec{B} = (B_x, B_z, 0)$), vereinfacht sich das Kräftegleichgewicht zu

$$\frac{1}{R(s)} = \frac{e}{p} \sqrt{B_x^2(s) + B_z^2(s)}, \quad (3.3)$$

wobei $p = m_e v_s$ der Impuls eines Elektrons mit der relativistischen Masse $m_e$ ist. Die transversalen Komponenten des Magnetfeldes lassen sich dann in der Umgebung des Designorbits zu einer Summe von Multipoltermen entwickeln. Die jeweiligen Multipolfelder können von als Dipol, Quadrupol, Sextupol, etc. bezeichneten Magneten erzeugt werden und werden zur Strahlführung im Speicherring eingesetzt (siehe Kapitel 4). Normalerweise werden die Magnete dabei aufrecht aufgestellt, so dass die Ablenkung der Elektronen in der horizontalen $x$-$s$-Ebene erfolgt und in dieser Ebene keine horizontalen Feldkomponenten vorhanden sind [74]:

$$\frac{e}{p} B_z(x, z) = \frac{e}{p} B_{z,0} + \frac{e}{p} \frac{\partial B_z}{\partial x} x + \frac{1}{2!} \frac{e}{p} \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} (x^2 - z^2) + \cdots$$

$$= \frac{1}{R} + k \cdot x + \frac{1}{2!} m (x^2 - z^2) + \cdots \quad (3.4)$$

Dipol Quadrupol Sextupol

Die horizontalen Feldkomponenten in der $z$-$s$-Ebene lassen sich ebenfalls aus dieser Magnetkonfiguration entwickeln:

$$\frac{e}{p} B_x(x, z) = \frac{e}{p} B_{x,0} + \frac{e}{p} \frac{\partial B_x}{\partial z} z + \frac{e}{p} \frac{\partial^2 B_x}{\partial z^2} z + \cdots$$

$$= 0 + k \cdot z + m \cdot x \cdot z + \cdots \quad (3.5)$$

Dipol Quadrupol Sextupol
An Gleichungen 3.4 und 3.5 ist zu erkennen, dass bei dieser aufrechten Konfiguration das konstante Dipol-Feld $B_0$ in der $z$-Ebene gleich Null ist und in der $x$-Ebene dem inversen Biegeradius der Dipol-Magnete entspricht.

Eine Umpolung des Magnetstromes zieht entsprechend eine Vorzeichenänderung der jeweiligen Multipolkomponenten nach sich, wodurch der Stahl in die entgegengesetzte Richtung abgelenkt wird, das heißt die Vorzeichen der Terme in Gleichungen 3.4 und 3.5 entsprechen der Polung des Magnetstromes.

Werden die Magnete um $\Theta = \pi/2n$ gedreht, wobei $n$ die Ordnung des Multipolfeldes ist, so vertauscht sich ihre Wirkungsebene. Es ergibt sich dann [74]

$$0 + \bar{k} \cdot z + m \cdot x \cdot z + \cdots$$

(3.6)

Dipol Quadrupol Sextupol

($\Theta = 90^\circ$) ($\Theta = 45^\circ$) ($\Theta = 30^\circ$)

für die $x$-$s$-Ebene und

$$-\frac{1}{R} - k \cdot x - \frac{1}{2!} m (x^2 - z^2) - \cdots$$

(3.7)

Dipol Quadrupol Sextupol

($\Theta = 90^\circ$) ($\Theta = 45^\circ$) ($\Theta = 30^\circ$)


Um $45^\circ$ gedrehte Quadrupole können auch gezielt eingesetzt werden, um eine bereits vorhandene Kopplung durch eine gegenteilige Wirkung zu kompensieren [72].

### 3.2. Bewegungsgleichung

#### 3.2.1. Betatronsschwingungen

Um die Bahn der Elektronen durch die Magnetstruktur zu berechnen, werden zunächst nur Multipole bis zur zweiten Ordnung in $x$ und $z$ in den Gleichungen 3.4 und 3.5 berücksichtigt. Dann ergibt sich für die horizontale Ebene [78]

$$x''(s) - \left( k_x(s) - \frac{1}{R_x^2(s)} \right) x(s) = \frac{1}{R_x(s)} \frac{\Delta p}{p}$$

(3.8)
3. Grundlagen der Strahlführung

und für die vertikale Ebene

\[ z''(s) + k_z(s) z(s) = 0. \] (3.9)

Hieraus können die Gleichungen für die Bewegung eines Elektrons für jede der beiden transversalen Richtungen \( \zeta = x, z \) erhalten werden, indem die Bahnfunktion \( \zeta(s) \) als eine Schwingung um den Orbit betrachtet wird, deren Amplitude und Phase von der Position \( s \) abhängen. Diese transversalen Schwingungen werden als Betatronschwingungen\(^1\) bezeichnet.

Wenn zunächst ausschließlich Teilchen mit Sollimpuls \((\Delta p/p = 0)\) betrachtet werden, dann folgt aus Gleichungen 3.8 und 3.9 die vereinfachte Bewegungsgleichung

\[ \zeta''(s) - k_\zeta^2 \zeta (s) = 0. \] (3.10)

Im Folgenden wird die Bewegung des Gesamtstrahls betrachtet, \( \zeta (s) \) bezeichnet also die Bahnfunktion vieler überlagerter Einzelteilchenbahnen. Der Einfluss der schwachen Fokusierung \( 1/R^2_x(s) \) der Dipole wird hier vernachlässigt; die Erläuterung folgt in Kapitel 4.3. Damit kann die Bewegungsgleichung in der vereinfachten Form \([52]\)

\[ \zeta''(s) - k_\zeta^2 \zeta (s) = 0. \] (3.11)

geschrieben werden. Dies ist eine Differentialgleichung des Hillschen Typs, welche sich durch den Ansatz einer quasiharmonischen Oszillation lösen lässt:

\[ \zeta(s) = \sqrt{\varepsilon_\zeta} \sqrt{\beta_\zeta(s)} \cos \left( \Psi_\zeta(s) + \phi_\zeta \right), \] (3.12)

mit

\[ \Psi_\zeta(s) = \int_0^s \frac{ds'}{\beta_\zeta(s')}. \] (3.13)

Dazu werden die Betafunktion \( \beta_\zeta(s) \) sowie die Emittanz \( \varepsilon_\zeta \) eingeführt. \( \phi_\zeta \) bezeichnet einen konstanten Phasenversatz, der für jedes Einzelteilchen einen beliebigen Wert annehmen kann. Dagegen beschreibt \( \Psi_\zeta(s) \) die Betatronphase des Gesamtstrahls. Im Folgenden werden nur die Symbole \( \beta(s) \) und \( \Psi(s) \) verwendet, wobei immer beide Ebenen gemeint sind.

\(^{1}\)Der Name Betatronschwingungen bezieht sich auf die Beobachtung dieser Schwingungen an Betatron-Beschleunigeranlagen, in denen Betateilchen (Elektronen und Positronen) mit einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld beschleunigt werden.
3.2.2. Dispersion

Für die vollständige Lösung der Bewegungsgleichungen 3.8 und 3.9 unter Berücksichtigung einer Impulsabweichung $\Delta p/p$ ergibt sich als partikuläre Lösung die Dispersion $D(s)$. Die Elektronen folgen dann Dispersionsbahnen, was zu einer horizontalen Aufweitung des Strahls führt (Abbildung 3.2).

Abbildung 3.2: Sollbahn (blau) und Dispersionsbahnen für Teilchen mit Impulsabweichung. Teilchen mit höherem Impuls folgen Bahnen mit größerem Radius (rot), Teilchen mit geringerem Impuls folgen Bahnen mit kleinerem Radius (grün) [78].

3.2.3. Strahlbreite

Da die Elektronen im Gesamtstrahl näherungsweise normalverteilt sind, werden die Strahlbreiten $\sigma_x(s)$ durch die Gaußverteilung der Ladungsdichte

$$
\rho(s) = \frac{Ne}{2\pi\sigma_x(s)\sigma_z(s)} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2(s)} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2(s)}\right)
$$

(3.14)
definiert [78]. Darin bezeichnet $N$ die Anzahl der Teilchen im Strahl. Die Strahlbreite $\sigma_z(s)$ ist der Abstand vom Strahlschwerpunkt, bei dem die Ladungsdichte auf $\exp\left(-\frac{1}{2}\right)$ abgefallen ist. Dies entspricht genau einer Standardabweichung der statistischen Teilchenverteilung. Anschaulich kann die Strahlbreite $\sigma_z(s)$ als Einhüllende betrachtet werden, welche die Einzelteilchenbahnen umschließt (Abbildung 3.3).
3. Grundlagen der Strahlführung

Abbildung 3.3: Verlauf einer (oben) und mehrerer (unten) Einzelteilchenbahnen $\zeta(s)$ innerhalb der Enveloppe $\sigma(s)$ [78].

Diese Einhüllende wird als Enveloppe bezeichnet und durch die Betafunktion $\beta(s)$, die Emittanz $\varepsilon$ und die Dispersion $D(s)$ beschrieben:

$$\sigma(s) = \sqrt{\varepsilon \beta(s) + D^2(s) \left( \frac{\Delta p}{p} \right)^2}.$$  \hspace{1cm} (3.15)

3.2.4. Emittanz

Für ein Elektron entspricht die Emittanz $\varepsilon$ der Fläche $A$ der durch dieses Elektron im Phasenraum $\zeta, \zeta'$ beschriebenen Ellipse geteilt durch $\pi$ (Abbildung 3.4). Diese Fläche bleibt aufgrund des Satzes von Liouville [63] immer konstant.
3.2. Bewegungsgleichung

Abbildung 3.4: Phasenraumellipse der Teilchenbewegung in einer Ebene [78].

Im Weiteren bezeichnet die Emittanz immer jene des Gesamtstrahls, die sich aus der Strahlbreite nach Gleichung 3.15 ergibt:

\[ \varepsilon = \frac{\sigma^2(s) - D^2(s) \left( \frac{\Delta p}{p} \right)^2}{\beta(s)}. \] (3.16)

Wegen der Konstanz der Emittanz lässt sich der lokale Strahlquerschnitt unter Vernachlässigung der Dispersion durch die Betafunktion \( \beta(s) \) beschreiben. Daher wird diese auch als Amplitudenfunktion bezeichnet. Die Betafunktion ist periodisch mit dem Umfang \( L \) des Speicherrings.

Weiterhin werden noch die Parameter \( \alpha(s) \) und \( \gamma(s) \) auf Basis der Ableitung der Betafunktion

\[ \beta'(s) = \frac{d\beta(s)}{ds} \] (3.17)

definiert, die sich ebenfalls aus der Phasenraumellipse (Abbildung 3.4) ergeben [8]:

\[ \alpha(s) := -\frac{1}{2} \beta'(s) \] (3.18)

und

\[ \gamma(s) := \frac{1 + \alpha^2(s)}{\beta(s)}. \] (3.19)
Der Arbeitspunkt oder $Q$-Wert wird als

$$Q := \frac{\mu}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^L \frac{ds}{\beta(s)} \quad (3.20)$$

definiert. Er gibt die Zahl $\mu$ der Betatronschwingungen pro Umlauf an.

Da die Teilchen in Speicherringen vielfach dieselben magnetischen Felder durchlaufen, können die Betatronschwingungen resonant angeregt werden. Dieses Phänomen kann zu Strahlverlusten führen, wenn die Elektronen durch eine immer größer werdende Ablage vom Designorbit auf die Vakuumkammerwand treffen. Mit Hilfe des Arbeitspunktes lassen sich Aussagen über das Resonanzverhalten des Strahls treffen.

Beispielsweise erreichen die Elektronen für einen ganzzahligen Arbeitspunkt einen möglichen Dipol-Feldfehler immer zur gleichen Betatronphase, wodurch sich die dadurch entstehenden Ablenkungen über mehrere Umläufe aufsummieren. Entsprechend wird der Strahl durch höhere Multipolfelder bei Bruchteilen des Arbeitspunktes resonant angeregt. Bei Quadrupolfeldern erfolgt eine Anregung entsprechend bei halbzahligem, bei Sextupol-Feldern bei drittelzahligem Arbeitspunkt; weitere Multipolfelder regen ebenfalls Resonanzen an. Mit zunehmender Ordnung in $x$ oder $z$ wirken diese sich jedoch in immer geringerem Maße auf den Strahl aus. Dies liegt darin begründet, dass die Einzelteilchenphase $\phi$ sich mit jedem Umlauf um den nichtganzzahligen Teil $q$ des Arbeitspunktes ändert, so dass der Ordnung entsprechend viele Umläufe notwendig sind, bis die Resonanzbedingung wieder erfüllt ist. Da dieser Phasenvorschub jedoch bei jedem Umlauf um einen geringen Betrag $\Delta\phi$ abweichen kann, wird die Wahrscheinlichkeit für die Erfüllung der Resonanzbedingung mit zunehmender Zahl der Umläufe immer geringer.

Optische Resonanzen können in beiden transversalen Schwingungsebenen auftreten. Weiterhin sind aufgrund höherer Multipolfelder sowie Fehlauflmentlungen der Magnete immer Kopplungen zwischen den Ebenen vorhanden (siehe Gleichungen 3.4 und 3.5 sowie Kapitel 4.5), wodurch auch Koppelresonanzen entstehen. Die allgemeine Resonanzbedingung für eine Störung der Ordnung $m + n$ lautet [74]

$$mQ_x + nQ_z = p \quad (3.21)$$

für Summenresonanzen und

$$mQ_x - nQ_z = p \quad (3.22)$$

für Differenzresonanzen, wobei $m$, $n$ und $p$ nichtnegative ganze Zahlen sind. Summenresonanzen können destruktiv sein, indem die Amplitude der Betatronschwingung unendlich groß wird. Differenzresonanzen führen nur zu einem Austausch von Betatronschwingungen.
3.3. Transformationsmatrizen

Eine einfache Möglichkeit der Transformation eines Bahnvektors

\[
\begin{pmatrix}
\zeta(s) \\
\zeta'(s)
\end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix}
\zeta_0 \\
\zeta'_0
\end{pmatrix}
\] (3.23)

der Elektronen mit der Ablage \(\zeta_0\) und dem Winkel \(\zeta'_0\) vom Designorbit durch eine Magnetstruktur vom Ort \(s_0\) zum Ort \(s\) kann im Rahmen der Matrizenoptik erfolgen. Die allgemeine Transformationsmatrix ergibt sich nach [78] zu

\[
\mathbf{M}(s) = \begin{pmatrix}
\sqrt{\frac{\beta(s)}{\beta_0}} \cos \Delta \Psi + \alpha_0 \sin \Delta \Psi & \sqrt{\frac{\beta(s)}{\beta_0}} \sin \Delta \Psi \\
\frac{(\alpha_0 - \alpha(s)) \cos \Delta \Psi - (1 + \alpha_0 \alpha(s)) \sin \Delta \Psi}{\sqrt{\beta(s) \beta_0}} & \frac{\beta(s)}{\beta_0} \cos \Delta \Psi - \alpha(s) \sin \Delta \Psi
\end{pmatrix}
\] (3.24)

Darin sind \(\beta_0\) und \(\beta(s)\) die Betafunktionen an den Orten \(s_0\) und \(s\) sowie \(\alpha_0\) und \(\alpha(s)\) die entsprechenden Funktionswerte nach Gleichung 3.18, die sich aus den Steigungen der Betafunktionen ergeben. \(\Delta \Psi\) ist der Phasenvorschub zwischen \(s_0\) und \(s\).

Abbildung 3.5: Arbeitspunktdiagramm mit Resonanzlinien bis zur fünften Ordnung. Die Linienbreite nimmt mit zunehmender Ordnung ab. Die diagonalen Linien markieren Koppelresonanzen, wobei fallende Linien Summenresonanzen und steigende Linien Differenzresonanzen entsprechen [74]. Die Raute (grün) markiert einen gemessenen Arbeitspunkt für die Standardoptik in Delta.
3. Grundlagen der Strahlführung

Auf diese Weise lässt sich bei Kenntnis der Parameter $\beta$, $\alpha$ und $\Psi$ für jeden Teilabschnitt der Magnetstruktur eine Matrix aufstellen. Folgerichtig aneinander multipliziert ermöglichen sie die Transformation des Bahnvektors durch den gesamten Abschnitt.

Für einen vollen Umlauf vereinfacht sich Gleichung 3.24 für $\beta(s) = \beta_0$, $\alpha(s) = \alpha_0$ und $\gamma(s) = \gamma_0$ zu

$$M_{\text{Umlauf}}(s) = \begin{pmatrix}
\cos \mu + \alpha(s) \sin \mu & \beta(s) \sin \mu \\
-\gamma(s) \sin \mu & \cos \mu - \alpha(s) \sin \mu
\end{pmatrix}. \quad (3.25)$$

Darin ist $\mu = 2\pi Q$ nach Gleichung 3.20.
4. Elemente der Strahlführung

Um die Elektronen auf den Designorbit zu zwingen, werden Magnete mit verschiedenen Multipolfeldern eingesetzt, die im Folgenden beschrieben werden. Die Gesamtheit der strahlführenden Felder wird dabei als Optik bezeichnet.

Bei Kenntnis der magnetischen Feldstärken können für jeden Magnettypen spezielle Transformationsmatrizen aufgestellt werden [78], die aneinander multipliziert die Transformation des Bahnvektors durch den entsprechenden Abschnitt ermöglichen (siehe Kapitel 3.3). Im Weiteren werden vierdimensionale Transformationsmatrizen angegeben, die zugleich beide transversalen Raumrichtungen \( x \) und \( z \) enthalten.

Zur vollständigen Beschreibung der Strahlbewegung, einschließlich der durch Impulsabweichungen und Bahnlängenabweichungen bedingten Orbitänderungen, müssen sechsdimensionale Transformationsmatrizen betrachtet werden (siehe auch Kapitel 7.2). Für eine weitergehende Betrachtung sei auf [22], [28] und [38] verwiesen.

4.1. Reale Magnete

4.1.1. Effektive Magnetlänge

Bei der folgenden Betrachtung realer Magnete ist zu beachten, dass die magnetischen Felder nicht dem Modell eines kastenförmigen Potentials entsprechen, da die Feldstärke im Randbereich nicht abrupt abfällt. Diese Randfelder werden zur einfacheren Berechnung in einem Rechteckmodell mit der effektiven Magnetlänge \( l_{\text{eff}} \) berücksichtigt. Innerhalb dieser Strecke wird die Feldverteilung als konstantes Feld \( B_{\text{eff}} \) und außerhalb als Null angenommen, so dass

\[
\int B(s)\,ds = B_{\text{eff}} \cdot l_{\text{eff}} \tag{4.1}
\]

gewährt bleibt.

Die Definition der effektiven Länge kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, je nachdem wie die beiden freien Parameter bestimmt werden. Bei DELTA ergibt sich \( \int B(s)\,ds \) aus einer Messung des magnetischen Feldes über die Länge des Magneten und der Randfelder.
innerhalb eines Bereiches, in dem das Magnetfeld bis auf einen bestimmten Wert abfällt\(^1\). \(B_{\text{eff}}\) wird dann als Mittelwert \(\overline{B}\) des Feldes in diesem Bereich berechnet. Die effektiven Längen der kurzen und der langen Quadrupole ergeben sich damit zu 0.234 m und 0.434 m \([17]\).

### 4.1.2. Integrale Multipolstärken

Da oft der integrale Effekt eines ausgedehnten Magneten auf den Teilchenstrahl von Interesse ist, werden die jeweiligen integralen Multipolstärken aus Gleichungen 3.4 und 3.5 durch Multiplikation mit der effektiven Magnetlänge berechnet. Es ergibt sich dann der durch die entsprechenden Felder über die effektive Länge des Magneten verursachte Ablenkwinkel:

\[
\frac{e}{p} B_z(x,z) l_{\text{eff}} = \theta_x = \frac{1}{R} l_{\text{eff}} + k \cdot x \cdot l_{\text{eff}} + \frac{1}{2!} m (x^2 - z^2) l_{\text{eff}} + \cdots
\]

und

\[
\frac{e}{p} B_x(x,z) l_{\text{eff}} = \theta_z = 0 + k \cdot z \cdot l_{\text{eff}} + m \cdot x \cdot z \cdot l_{\text{eff}} + \cdots.
\]

### 4.1.3. Hysterese


\(^1\)Die Randbedingungen für die Definition der aktuell bei DELTA verwendeten effektiven Längen sind nicht bekannt. Bei den in \([7]\) dokumentierten Magnetvermessungen sind noch abweichende Werte für \(l_{\text{eff}}\) angegeben, die aus einer üblichen Näherung (\(l_{\text{eff}} =\) Magnetjochlänge + Aperturradius) resultieren. In \([17]\) werden bereits die aktuellen Werte verwendet, jedoch ohne Quellenangabe.

\(^2\)Eine ausführliche Beschreibung des Hysteresephänomens findet sich in \([34]\).
4.2. Driftstrecken


4.1.4. Umrechnung von Magnetströmen in Magnetstärken


4.2. Driftstrecken

Driftstrecken sind feldfreie Abschnitte, in denen sich die Elektronen linear fortbewegen. Die Transformationsmatrix für eine Driftstrecke lautet dementsprechend

\[
\mathbf{M}_{\text{Drift}}(s) = \begin{pmatrix}
1 & s - s_0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & s - s_0 \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{pmatrix}.
\] (4.4)
4. Elemente der Strahlführung

4.3. Dipol-Magnete

Um innerhalb eines Kreisbeschleunigers eine geschlossene Umlaufbahn zu erhalten, werden die Elektronen mit Hilfe von räumlich konstanten Dipol-Feldern der Stärke $\frac{1}{R}$ kreisförmig abgelenkt (Abbildung 4.2).

Abbildung 4.2: Polflächen (links) eines Dipols mit Feldlinien (grün) und resultierender Ablenkung (rot) sowie Aufbau eines Dipol-Magneten (rechts) am Beispiel des DELTA-C-Magneten [78].

Für einen Dipol ergibt sich die somit die Transformationsmatrix

$$
M_{\text{Dipol}}(s) = \begin{pmatrix}
\cos \frac{s - s_0}{R} & R \sin \frac{s - s_0}{R} & 0 & 0 \\
\frac{1}{R} \sin \frac{s - s_0}{R} & \cos \frac{s - s_0}{R} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & s - s_0 \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{pmatrix}. \quad (4.5)
$$

4.3.1. Schwache Fokussierung

Beim Vergleich von Gleichung 4.5 mit der Transformationsmatrix eines fokussierenden Quadrupols (Gleichung 4.9) wird erkennbar, dass auch Dipole eine fokussierende Wirkung auf den Strahl haben. Diese ist jedoch relativ schwach und wird daher als schwache Fokussierung bezeichnet. Das Prinzip ist in Abbildung 4.3 ersichtlich. Die schwache Fokussierung tritt nur in der horizontalen Ebene auf, da in der vertikalen Ebene keine Ablenkung des Teilchenstrahls erfolgt.
4.3. Dipol-Magnete

Abbildung 4.3: Prinzip der schwachen Fokussierung: Das Teilchen tritt bei A in das Magnetfeld ein, kreuzt bei B den Designorbit und tritt bei C wieder aus dem Magnetfeld aus [78].

4.3.2. Kantenfokussierung

Aufgrund der kostengünstigeren Fertigungsmöglichkeit werden normalerweise keine Sektormagnete verwendet, deren Stirnflächen senkrecht zum Designorbit stehen, sondern Rechteckmagnete mit parallelen Stirnflächen. Dadurch treten die Teilchen unter einem Winkel $\Phi$ in das Dipol-Feld ein und aus diesem aus (Abbildung 4.4). Dies hat zur Folge, dass die Teilchen im Rechteckmagneten eine um $\Delta l$ kürzere Strecke zurücklegen als im Sektormagneten und daher um den Winkel $\Delta \theta$ weniger abgelenkt werden, was einer horizontalen Defokussierung entspricht.

Abbildung 4.4: Prinzip der Kantenfokussierung: Teilchenbahn im Sektor- und im Rechteckmagneten (siehe Text) [78].
4. Elemente der Strahlführung

In den Dipol-Randfeldern sind außerdem fokussierende Feldkomponenten vorhanden, die auf einen senkrecht eintretenden Strahl keine Wirkung haben. Beim Rechteckmagneten führen sie jedoch aufgrund des Winkels \( \Phi \) zu einer vertikalen Fokussierung des Teilchenstrahls\(^3\).

Insgesamt ergibt sich die Transformationsmatrix für die Kantenfokussierung also zu

\[
M_{\text{Kante}} = \begin{pmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 \\
\tan \Phi & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & -\tan \Phi & R & 1
\end{pmatrix}.
\]

(4.6)

Durch folgerichtige Multiplikation der Transformationsmatrizen für den Dipol und seine Kantenfokussierungen erhält man somit die Transformationsmatrix eines Rechteckmagneten. Hierbei wird ersichtlich, dass sich in erster Näherung bei einem Rechteckmagneten aufgrund der Kantenfokussierung die schwache Fokussierung von der horizontalen in die vertikale Ebene verlagert.

4.3.3. Sextupol-Komponenten der Dipol-Randfelder

In den Randfeldern der Dipole entstehen auch höhere Multipolfeldkomponenten, beispielsweise durch Sättigungseffekte. In erster Linie sind dies Sextupol-Felder [7], die mit Gleichung 4.21 beschrieben werden können und ebenfalls durch eingangs- und ausgangsseitige Transformationsmatrizen berücksichtigt werden.

4.3.4. Dipol-Störungen

In den Dipolen wird das Koordinatensystem gedreht, so dass die \( s \)-Achse immer in Richtung des Designorbits weist. Sobald an anderen Stellen ein Dipol-Feld auftritt, entweder gewollt, wie in Kapitel 5 beschrieben, oder als Feldfehler, wird die resultierende Ablenkung des Teilchenstrahls eine Ablage vom Designorbit zur Folge haben. Es stellt sich dann ein neuer Gleichgewichtsorbit ein, der einer ortsfesten Betatronschwingung um den ungestörten Orbit mit einem Winkel- und Phasensprung an der Stelle des zusätzlichen Dipol-Feldes entspricht (Abbildung 4.5).

\(^3\)Für eine weitere Erläuterung siehe [78].

22
4.3. Dipol-Magnete

Abbildung 4.5: Ablenkung der Teilchenbahn um den Winkel \( \theta \) durch ein zusätzliches Dipolfeld [78].

Bei einer Ablenkung des Teilchenstrahls um einen Winkel \( \theta_{\xi,j} \) am Ort \( s_j \) stellen sich über den gesamten Speicherring die Strahlablagen \( \zeta_i(s_i) \) vom Designorbit ein [52]:

\[
\zeta_i(s_i) = \theta_{\xi,j} \sqrt{\frac{\beta_{\xi,i} \beta_{\xi,j}}{2 \sin(\pi Q_{\xi})}} \cos\left(|\Psi_{\xi,i} - \Psi_{\xi,j}| - \pi Q_{\xi}\right).
\] (4.7)

Darin sind \( \beta_{\xi,i,j} \) und \( \Psi_{\xi,i,j} \) die Betafunktionen und die Betatronphasen an den entsprechenden Orten, \( Q_{\xi} \) ist der Arbeitspunkt der jeweiligen Ebene.

4.3.5. Berechnung der Strahlenergie

Die Berechnung der mittleren kinetischen Energie \( E \) des Teilchenstrahls in Delta erfolgt aus dem Erregungsstrom \( I_{20} \) der 20°-Dipole auf Basis eines Polynoms vierten Grades, dass an eine Messkurve der Dipol-Feldstärke gegen den Spulenstrom angepasst wurde\(^4\):

\[
E/\text{MeV} = a + I_{20} (b + I_{20} (c + I_{20} (d + I_{20} e)))
\] (4.8)

Die Werte der Konstanten \( a \) bis \( e \) können Tabelle 4.1 entnommen werden. Die dort aufgeführten Daten entstammen zum einen dem DELTA-Kontrollsystem (siehe Kapitel 6.6) und zum anderen dem Quelltext der Software-Bibliothek \( \text{i2k} \) [16].

\(^4\)Die Messdaten stammen aus [7], das Polynom wurde in [15] neu bestimmt.
4. Elemente der Strahlführung

<table>
<thead>
<tr>
<th>Kontrollsystem</th>
<th>i2k</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>(a)</td>
<td>0.2132</td>
</tr>
<tr>
<td>(b)</td>
<td>1.642</td>
</tr>
<tr>
<td>(c)</td>
<td>(-3.625 \cdot 10^{-4})</td>
</tr>
<tr>
<td>(d)</td>
<td>(8.814 \cdot 10^{-7})</td>
</tr>
<tr>
<td>(e)</td>
<td>(-6.535 \cdot 10^{-10})</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**Tabelle 4.1**: Empirisch ermittelte Konstanten zur Berechnung der Delta-Strahlergie, dem DELTA-Kontrollsystem sowie dem i2k-Quelltext [16] entnommen.

Die meisten Software-Programme des Kontrollsystems verwenden die mit Hilfe des ersten Parametersatzes berechnete Energie. Im Rahmen dieser Arbeit wird aus Gründen der Kompatibilität zu i2k der zweite Parametersatz verwendet, da die Energie für die durchgeführten Messungen nicht explizit benötigt wird, jedoch die energieabhängigen Magnetstärken, die mit Hilfe von i2k berechnet werden (siehe Kapitel 7.2).

4.3.6. Dipole in Delta

In Delta kommen Dipole mit zwei unterschiedlichen Längen zum Einsatz. Die sechzehn 20°-Dipole zwischen den Quadrupol-Triplets (siehe Kapitel 4.4) in den Bögen des Speicherrings haben eine Jochlänge von 115.0 cm und besitzen jeweils 64 Windungen [17]. Vor und nach den Insertion Devices kommen insgesamt acht Dipole mit einer Jochlänge von 52.5 cm und ebenfalls 64 Windungen zum Einsatz, die eine maximale Ablenkung des Strahls von 10° ermöglichen. Durch unterschiedliche Bestromung werden sie als 7°- beziehungsweise 3°-Dipole betrieben, von denen jeweils vier Stück eingebaut sind.

**Stromversorgung**


5Für die Orbitkorrektur (siehe Kapitel 5.3) wird die Energie nach einer anderen Methode iterativ aus den Strömen aller Dipol-Familien (20°, 7°, 3°) unter Berücksichtigung der gekrümmten Teilchenbahn im Dipol und des Einflusses der Hochfrequenz berechnet [17].
4.4. Quadrupol-Magnete

Alleine mit den Dipolen kann aufgrund stets vorhandener kleiner Feldfehler im Allgemeinen nur für wenige Teilchen eine geschlossene Bahn erreicht werden; aufgrund der stets vorhandenen Winkeldivergenz der meisten Einzelteilchen gegenüber der Strahlachse ist der gesamte Elektronenstrahl divergent. Damit eine geschlossene Umlaufbahn, der Gleichgewichtsorbit, erreicht werden kann, werden die Teilchen mit Quadrupol-Feldern der Stärke \( k \) fokussiert (Abbildung 4.6). Dabei ist die rücktreibende Kraft betragsmäßig proportional zur Ablage von den magnetischen Mitten der Quadrupole. Die von den magnetischen Mitten der realen Quadrupole festgelegte Bahn definiert im Folgenden den Designorbit.

**Abbildung 4.6:** Polflächen (links) eines horizontal fokussierenden Quadrupols mit Feldlinien (grün) und resultierender Ablenkung (rot) sowie Aufbau eines Quadrupol-Magneten (rechts) (Blick in Strahlrichtung) [78].

Quadrupole fokussieren den Strahl nur in einer Ebene, in der anderen wirken sie defokussierend. Dies ist an den Feldlinien in Abbildung 4.6 zu erkennen (siehe auch Gleichungen 3.8 und 3.9). Um eine Fokussierung des Strahls in beiden Ebenen zu erreichen, ist in jeder Ebene eine alternierende Anordnung von fokussierenden und defokussierenden Quadrupol-Feldern notwendig, wobei sich der größere Strahlquerschnitt und damit die größere Betafunktion jeweils in der fokussierenden Ebene eines Quadrupols befinden sollte (Abbildung 4.7).
Abbildung 4.7: Teilchenbahn durch eine Struktur aus Driftstrecken D und horizontal fokussierenden (rot) sowie defokussierenden (grün) Quadrupolen Q [78].

Mit $\Omega = \sqrt{|k|} (s - s_0)$ ergibt sich die Transformationsmatrix für einen horizontal fokussierenden Quadrupol-Magneten zu

$$M_{QF}(s) = \begin{pmatrix}
\cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{|k|}} \sin \Omega & 0 & 0 \\
-\sqrt{|k|} \sin \Omega & \cos \Omega & 0 & 0 \\
0 & 0 & \cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{|k|}} \sinh \Omega \\
0 & 0 & \sqrt{|k|} \sinh \Omega & \cosh \Omega
\end{pmatrix}, \quad (4.9)$$

mit $\Omega = \sqrt{k} (s - s_0)$ ergibt sich entsprechend für einen vertikal fokussierenden Quadrupol

$$M_{QD}(s) = \begin{pmatrix}
\cosh \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sinh \Omega & 0 & 0 \\
\sqrt{k} \sinh \Omega & \cosh \Omega & 0 & 0 \\
0 & 0 & \cos \Omega & \frac{1}{\sqrt{k}} \sin \Omega \\
0 & 0 & -\sqrt{k} \sin \Omega & \cos \Omega
\end{pmatrix}. \quad (4.10)$$

Dabei entspricht $s - s_0$ der in Kapitel 4.1 eingeführten effektiven Magnetlänge $l_{\text{eff}}$. 

26
4.4. Quadrupol-Magnete

Wenn die Länge $l$ eines Quadrupols viel kleiner als seine Brennweite $f$ ist, dann kann er näherungsweise als dünne Linse aufgefasst werden [74], so dass für $l_{\text{eff}} \to 0$ und $|k| \cdot l_{\text{eff}} = \text{const.}$ der Zusammenhang zwischen Quadrupol-Stärke und Brennweite durch

$$\frac{1}{f} = |k| \cdot l_{\text{eff}}$$

gegeben ist. Die Transformationsmatrix für einen horizontal fokussierenden Quadrupol wird dann nach Gleichung 4.9 zu

$$M'_{\text{QF}}(s) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

wird. Entsprechend ergibt sich für einen vertikal fokussierenden Quadrupol

$$M'_{\text{QD}}(s) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}.$$  (4.12)

4.4.1. Quadrupol-Störungen und Beta-Beating

Quadrupol-Feldfehler stören die Symmetrie der Magnetstruktur und ändern die Strahlfokussierung. Daraus resultieren Überlagerungen der vorhandenen quasi sinusförmigen Betatronschwingungen mit weiteren harmonischen Schwingungen. Diese Überlagerungen werden als Beta-Beating bezeichnet. Das durch ein zusätzliches Quadrupol-Feld der Stärke $\Delta k$ an einem Magneten mit der effektiven Länge $l_{\text{eff}}$ am Ort $s_0$ verursachte Beta-Beating ergibt sich an allen Orten $s$ in erster Näherung zu [74, 39]

$$\frac{\Delta \beta(s)}{\beta_0(s)} = \beta(s) / \beta_0(s) = \Delta k \cdot l_{\text{eff}} \cdot \frac{\beta_0(s_0)}{2 \sin(2\pi Q_0)} \cdot \cos(2|\Psi_0(s) - \Psi_0(s_0)| - 2\pi Q_0).$$

Dabei sind $Q_0$ der ungestörte Arbeitspunkt, $\beta_0$ die ungestörten Betafunktionen und $\Psi_0$ die ungestörten Betatronphasen.

Zusammen mit der Änderung der Betafunktion ergibt sich auch eine entsprechende Variation der Betatronphase (Phase-Beating) [74, 2]:

$$\Delta \Psi(s) = \begin{cases} \Delta k \cdot l_{\text{eff}} \left( \frac{\beta_0(s_0)}{2 \sin(2\pi Q)} \cos(\Psi_0(s) - 2\Psi_0(s_0)) + 2\pi Q \sin(\Psi_0(s)) \right) & \text{für } \Psi_0(s) < \Psi_0(s_0) \\
\Delta k \cdot l_{\text{eff}} \left( \frac{\beta_0(s_0)}{2 \sin(2\pi Q)} \cos(\Psi_0(s) - 2\Psi_0(s_0)) \sin(\Psi_0(s) - 2\pi Q) \right) & \text{für } \Psi_0(s) > \Psi_0(s_0) \end{cases}.$$  (4.15)
4. Elemente der Strahlführung

Diese Änderung des Phasenvorschubs um $\Delta \Psi$ führt wiederum zu einer Änderung des Arbeitspunktes um [8, 52]

$$\Delta Q = \frac{\Delta \Psi}{2\pi}. \quad (4.16)$$

Die Quadrupol-Stärke $k$ führt nach Gleichungen 4.2 und 4.3 zu einem Kickwinkel

$$\theta_\zeta(s) = k \cdot l_{\text{eff}} \cdot \zeta(s) \quad (4.17)$$

des Strahls in der Ebene $\zeta$ am Ort $s$ des Quadrupols.

Eine Änderung der Quadrupol-Stärke $k$ um $\Delta k$ erzeugt aufgrund des Beta-Beatings einen neuen Gleichgewichtsorbit. Unter Berücksichtigung des Beat-Faktors $1 + \frac{\Delta \beta(s)}{\beta_0(s)}$ [74] führt dies zu einer Änderung des Kickwinkels $\theta_\zeta(s)$ um $\Delta \theta_\zeta(s)$:

$$\theta_\zeta(s) + \Delta \theta_\zeta(s) = (k + \Delta k) l_{\text{eff}} \zeta(s) \left[ 1 + \frac{\Delta \beta_\zeta(s)}{\beta_\zeta_0(s)} \right] \quad (4.18)$$

$$= (k + \Delta k) l_{\text{eff}} \left[ \zeta(s) + \zeta(s) \frac{\Delta \beta_\zeta(s)}{\beta_\zeta_0(s)} \right]. \quad (4.19)$$

Der Term $\zeta(s) \frac{\Delta \beta_\zeta(s)}{\beta_\zeta_0(s)}$ beschreibt die durch den neuen Gleichgewichtsorbit hervorgerufene Änderung der Strahlablage und wird daher im Folgenden mit $\Delta \zeta(s)$ bezeichnet. Damit wird Gleichung 4.19 zu

$$\theta_\zeta(s) + \Delta \theta_\zeta(s) = (k + \Delta k) l_{\text{eff}} (\zeta(s) + \Delta \zeta(s)). \quad (4.20)$$
4.4. Quadrupol-Magnete

4.4.2. Quadrupole in Delta

Im Speicherring Delta werden 58 kurze und 18 lange Quadrupole mit Jochlängen von 0.20 m und 0.40 m eingesetzt. Jede der vier Spulen eines Quadrupols hat 188 Windungen.

Die Positionen der Quadrupole im Speicherring lassen sich Abbildung 4.8 entnehmen.

Abbildung 4.8: Positionen und Nomenklatur der Quadrupole (orange) im Speicherring Delta.

4.4.2.1. Triplett-Struktur

Die in Delta eingebauten Quadrupole sind in den Bögen in Triplett-Strukturen angeordnet (Abbildung 4.9). Diese bestehen aus jeweils drei Quadrupolen, die sich zwischen den 20°-Dipolen befinden [53]. Die mittleren Quadrupole der Triplets sind vom langen Typ, die beiden äußeren sowie alle weiteren Quadrupole in Delta sind kurze Typen. Insgesamt befinden sich 18 solcher Triplets in Delta.
4. Elemente der Strahlführung

Abbildung 4.9: Ein Delta-Triplet mit drei Quadrupol-Magneten.


Abbildung 4.10: Abbildung eines Achsenpunktes ins Unendliche mit einem Quadrupol-Dublett (links) und mit einem Quadrupol-Triplett (rechts) [5].

4.4.2.2. Mechanischer Aufbau


Abbildung 4.11: Höhenjustage der Quadrupol-Magnete durch Dreipunktlagerung auf Gewindestangen (gelbe Pfeile).

4.4.2.3. Stromversorgung

Für die Delta-Standardoptik müssen jeweils mehrere Quadrupole identisch bestromt werden. Daher sind die Quadrupole zu 24 Familien zusammengefasst, wobei jeweils zwei oder vier Quadrupole von einem von insgesamt 30 Netzgeräten gespeist werden. Der Maximalstrom liegt bei ± 60 A, wobei die Netzgeräte unipolar ausgelegt sind. Die Quadrupole der qf- und qd-Familien sind dabei fest verkabelt, so dass sie fokussierend beziehungsweise defokussierend auf die horizontale Strahlebene wirken. Die Quadrupol-Netzgeräte der qn- und qs-Familien können jeweils mit einem Schlüsselschalter umgepolt werden, um die Fokussierung an verschiedene Optiken anpassen zu können.

Die Quadrupol-Stärke ist bei Stromstärken über etwa ± 40 A sättigungsbedingten Korrekturen unterworfen [17]. Weiterhin sind an einigen Quadrupolen mit einem Abstand von 5.5 cm Sextupoljoche montiert, welche die effektive Länge und damit auch die integrale Quadrupol-Stärke reduzieren [15].

Zusatzstromversorgung

Für verschiedene Messungen ist es notwendig, jeden Quadrupol einzeln in der Stärke variieren zu können. Zu diesem Zweck kann ein Vier-Quadranten-Netzgerät\textsuperscript{6} über eine Relaiskaskade mit jedem einzelnen Quadrupol verbunden werden. Der hiermit erreichbare Zusatzstrom liegt zwischen ± 3 A bei einer Genauigkeit von etwa ± 0.01 A. Für weitere Details siehe [34].

Kalibration der Quadrupol-Netzgeräte

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Kalibrationsfaktoren für die Quadrupol-Netzgeräte gemessen, um die Abweichung der von den Netzgeräten ausgegebenen Ströme von den angeforderten Sollwerten zu bestimmen. Dazu wurde jeweils ein Sollstromwert eingestellt und anschließend der Spannungsabfall mit einem Multimeter der Firma Fluke [14] mit einer relativen Genauigkeit von ± 0.05 % an einem mittels Wasserkühlung temperaturstabilisierten Präzisionswiderstand der Firma Otto Wolff [80] mit einem Nennwert von 0.0025 Ω und einer relativen Genauigkeit von ± 0.03 % gemessen, der in Reihe mit den Magnetspulen am jeweiligen Netzgerät angeschlossen war. Daraus lassen sich der reale Stromwert sowie die prozentuale Abweichung zum Sollwert errechnen (Tabelle 4.2).

\textsuperscript{6}Vier-Quadranten-Netzgeräte können in allen vier Quadranten des Spannung-Strom-Diagramms arbeiten, das heißt den Strom unabhängig vom Vorzeichen der Spannung erhöhen oder senken.
<table>
<thead>
<tr>
<th>Netzgerät</th>
<th>Setzwert / A</th>
<th>Messwert / mV</th>
<th>Messwert / A</th>
<th>Abweichung / %</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>qd01+i</td>
<td>23.3884</td>
<td>58.651 ± 0.029</td>
<td>23.4604 ± 0.0137</td>
<td>0.31 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qd02+i</td>
<td>18.0495</td>
<td>45.255 ± 0.023</td>
<td>18.1020 ± 0.0106</td>
<td>0.29 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qd03+i</td>
<td>29.1300</td>
<td>73.040 ± 0.037</td>
<td>29.2160 ± 0.0107</td>
<td>0.29 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qd04+i</td>
<td>30.5011</td>
<td>76.515 ± 0.038</td>
<td>30.6060 ± 0.0178</td>
<td>0.34 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qd04+ii</td>
<td>30.5011</td>
<td>76.472 ± 0.038</td>
<td>30.5888 ± 0.0178</td>
<td>0.29 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qd04+iii</td>
<td>30.5011</td>
<td>76.498 ± 0.038</td>
<td>30.5992 ± 0.0178</td>
<td>0.32 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qd04+iv</td>
<td>30.4981</td>
<td>76.481 ± 0.038</td>
<td>30.5924 ± 0.0178</td>
<td>0.31 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qf01+i</td>
<td>23.8290</td>
<td>59.805 ± 0.030</td>
<td>23.9220 ± 0.0139</td>
<td>0.39 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qf02+i</td>
<td>36.0811</td>
<td>90.482 ± 0.045</td>
<td>36.1928 ± 0.0211</td>
<td>0.31 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qf03+i</td>
<td>36.0780</td>
<td>90.477 ± 0.045</td>
<td>36.1908 ± 0.0211</td>
<td>0.31 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qf03+ii</td>
<td>50.3425</td>
<td>126.305 ± 0.063</td>
<td>50.5220 ± 0.0295</td>
<td>0.36 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qf03+iii</td>
<td>50.3476</td>
<td>126.293 ± 0.063</td>
<td>50.5172 ± 0.0295</td>
<td>0.34 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qf03+iv</td>
<td>50.3425</td>
<td>126.203 ± 0.063</td>
<td>50.4812 ± 0.0294</td>
<td>0.27 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qn01+i</td>
<td>32.8120</td>
<td>85.198 ± 0.043</td>
<td>34.0792 ± 0.0199</td>
<td>3.72 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qn02+i</td>
<td>36.1460</td>
<td>90.651 ± 0.045</td>
<td>36.2604 ± 0.0211</td>
<td>0.32 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qn03+i</td>
<td>2.5960</td>
<td>6.718 ± 0.003</td>
<td>2.6872 ± 0.0016</td>
<td>3.39 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qn04+i</td>
<td>6.1100</td>
<td>15.821 ± 0.008</td>
<td>6.3284 ± 0.0037</td>
<td>3.45 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qn05+i</td>
<td>33.4460</td>
<td>86.674 ± 0.043</td>
<td>34.6696 ± 0.0202</td>
<td>3.53 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qn06+i</td>
<td>34.2820</td>
<td>88.934 ± 0.044</td>
<td>35.5736 ± 0.0207</td>
<td>3.63 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qn07+i</td>
<td>34.5749</td>
<td>86.751 ± 0.043</td>
<td>34.7004 ± 0.0202</td>
<td>0.36 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qn08+i</td>
<td>31.7247</td>
<td>79.662 ± 0.040</td>
<td>31.8648 ± 0.0186</td>
<td>0.44 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs01+i</td>
<td>18.3310</td>
<td>45.960 ± 0.023</td>
<td>18.3840 ± 0.0107</td>
<td>0.29 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs02+i</td>
<td>38.5770</td>
<td>96.772 ± 0.048</td>
<td>38.7088 ± 0.0226</td>
<td>0.34 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs03+i</td>
<td>22.2590</td>
<td>55.811 ± 0.028</td>
<td>22.3244 ± 0.0130</td>
<td>0.29 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs04+i</td>
<td>31.9380</td>
<td>80.092 ± 0.040</td>
<td>32.0368 ± 0.0187</td>
<td>0.31 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs05+i</td>
<td>24.5390</td>
<td>61.435 ± 0.031</td>
<td>24.5740 ± 0.0143</td>
<td>0.14 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs06+i</td>
<td>25.0050</td>
<td>62.672 ± 0.031</td>
<td>25.0688 ± 0.0146</td>
<td>0.25 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs07+i</td>
<td>15.4830</td>
<td>38.827 ± 0.019</td>
<td>15.5308 ± 0.0091</td>
<td>0.31 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs08+i</td>
<td>38.9710</td>
<td>97.729 ± 0.049</td>
<td>39.0916 ± 0.0228</td>
<td>0.31 ± 0.06</td>
</tr>
<tr>
<td>qs09+i</td>
<td>31.2610</td>
<td>78.189 ± 0.039</td>
<td>31.2756 ± 0.0182</td>
<td>0.05 ± 0.06</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Tabelle 4.2: Messdaten der Quadrupol-Netzgeräte-Kalibration.

Abb Abbildung 4.14: Aufbau eines Sextupol-Magneten [78].

Die Transformationsmatrix für einen Sextupol lautet [75]:

$$M_{\text{Sextupol}}(x_0, z_0, s) = \begin{pmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{2} m(s - s_0) x_0 & 1 & \frac{1}{2} m(s - s_0) z_0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & m(s - s_0) x_0 & 1
\end{pmatrix}. \quad (4.21)$$

Es ist zu beachten, dass die Sextupol-Stärke bei Delta nach Gleichung 3.4 als

$$m = \frac{e}{p} \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \quad (4.22)$$

definiert wird. Eine weitere gebräuchliche Definition umfasst auch den Faktor $1/2$:

$$m = \frac{1}{2!} \frac{e}{p} \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2}. \quad (4.23)$$

Dies ist in den verschiedenen Simulationsprogrammen (MAD, AT, etc.; siehe Kapitel 7) zu berücksichtigen.
4.5.1. Chromatizität

Die Chromatizität $\xi$ ist definiert als Arbeitspunktverschiebung (siehe Kapitel 3.2) je relativer Impulsabweichung, die sich aus der Integration über alle Quadrupole des Rings ergibt:

$$\xi = \frac{\Delta Q}{\Delta p/p} = -\frac{1}{4\pi} \oint k(s) \beta(s) ds.$$ \hspace{1cm} (4.24)

Wenn Elektronen mit Impulsabweichung einen Sextupol-Magneten nicht zentrisch durchlaufen, erfahren sie darin ein ortsabhängiges Feld. Dieses bewirkt eine zusätzliche Fokussierung, mit der die Fehlfokussierung der Quadrupole ausgeglichen werden kann (Abbildung 4.15):

$$k_{\text{sext}} = m \cdot D \cdot \frac{\Delta p}{p}.$$ \hspace{1cm} (4.25)

Wie in Abbildung 4.15 zu erkennen ist, können Sextupole die Chromatizität nur dann kompensieren, wenn sich die Teilchen auf Dispersionsbahnen befinden. Sextupole sollten daher möglichst an Orten großer Dispersion $D(s)$ eingebaut werden. Mit den im Ring verteilten Sextupolen ergibt sich die effektive Gesamtchromatizität aus der Summe der Fehlfokussierungen nach Gleichung 4.24 und der fokussierenden Wirkung der Sextupole nach Gleichung 4.25, wiederum über den Gesamtumlauf integriert [78]:

$$\xi_{\text{ges}} = \frac{1}{4\pi} \oint (m(s)D(s) - k(s)) \beta(s) ds.$$ \hspace{1cm} (4.26)

Außerdem ist die Chromatizität in beiden Ebenen unterschiedlich, so dass, ähnlich wie bei Quadrupolen, sowohl horizontal als auch vertikal kompensierende Sextupole benötigt werden. Ebenso sollte auch bei den Sextupolen die Betafunktion in der Ebene der zu kompensierenden Chromatizität möglichst groß sein, da ihre Wirkung nach Gleichung 4.26 proportional zur Größe der Betafunktion am Ort des Sextupols ist.
4.5. Probleme beim Einsatz von Sextupolen

Der Einsatz von Sextupolen hat mehrere Nachteile. Zum einen erzeugen Sextupole aufgrund ihrer nichtlinearen Eigenschaften nach Gleichung 3.4 anharmonische Oszillationen, was über viele Umläufe zu instabilen Teilchenbahnen führen kann. Dadurch kann der Phasenraum, in dem sich Teilchen stabil bewegen können, stark eingeschränkt werden. Dieser stabile Bereich wird als dynamische Apertur bezeichnet im Gegensatz zur mechanischen Apertur, welche durch die mechanische Ausdehnung der Strahlkammer vorgeben ist (siehe auch Kapitel 6.3). Um die dynamische Apertur nicht zu sehr einzuschränken, sollten möglichst viele verteilte Sextupole zum Einsatz kommen, auch wenn die Chromatizität mit wenigen Sextupolen kompensiert werden könnte [78].

Außerdem bewirken Sextupole nach Gleichungen 3.4 und 3.5 eine Kopplung der Bewegungsbahnen, wenn Teilchen den Magneten mit einer Ablage vom magnetischen Mittelpunkt durchlaufen. Letzteres spiegelt sich auch in der Transformationsmatrix 4.21 wider.

4.5.3. Sextupole in Delta

Im Speicherring Delta sind zwei Typen von Sextupolen integriert. Die 54 externen Sextupole besitzen sechs Polschuhe von 6.5 cm Länge mit jeweils 189 Windungen auf einem 5 cm dicken Joch [7]. Sie sind über Aluminiumträger in einem Abstand von 5.5 cm zentrisch an den Quadrupol-Jochen montiert (Abbildung 4.16).

Abbildung 4.16: Externer Sextupol (blauer Pfeil), Jochspulen der internen Sextupole (gelbe Pfeile) sowie horizontale (grüner Pfeil) und vertikale (rote Pfeile) Dipol-Korrektorspulen.

Abbildung 4.17: Polspulen der internen Sextupole (gelbe Pfeile).
4.6. Vorzeichenkonventionen

Bei DELTA werden folgende Vorzeichenkonventionen verwendet [78, 17]:

• Die Ablenkradien $R$ der Dipole und die Ablenkwinkel $\theta_x$ der horizontalen Korrektoren sind negativ, wenn der Strahl in $-x$-Richtung, also nach innen, abgelenkt wird.

• Die Ablenkwinkel $\theta_z$ der vertikalen Korrektoren sind positiv, wenn der Strahl in $+z$-Richtung, also nach oben, abgelenkt wird.

• Die Quadrupol-Stärken $k$ horizontal fokussierender Quadrupole sind negativ, die horizontal defokussierender Quadrupole sind positiv.

• Die Sextupol-Stärken $m$ zur horizontalen Korrektur der Fokussierung sind negativ, die zur vertikalen Korrektur der Fokussierung sind positiv, jeweils in Bereichen positiver Dispersion.
5. Messung und Korrektur der Strahlage

5.1. Strahllagemonitore


Abbildung 5.1: Querschnitt durch einen Strahllagemonitorkopf mit Vergrößerung einer Pickup-Elektrode [21, 29].

5. Messung und Korrektur der Strahllage

eine Strahlposition umgerechnet, welche sich aus den $i = 1 \ldots 4$ Signalen $S_i$ der Elektroden ergibt [29]:

$$x = a^b \frac{(S_2 + S_4) - (S_1 + S_3)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \tag{5.1}$$

und

$$z = a^b \frac{(S_1 + S_2) - (S_3 + S_4)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \tag{5.2}$$

Darin ist $a^b$ ein monitorabhängiger Kalibrationsfaktor.

Die BPM-Köpfe werden über SMA$^1$-Anschlüsse mit den Auswertelektroniken verbunden. Die eingesetzten Elektroniken sind hauptsächlich vom Typ MX-BPM der Firma Bergoz Instrumentation [6], deren Frequenzfilter und Kalibrationsfaktoren für DELTA angepasst wurden und zum Entfernen von Störsignalen die einzelnen Signale mit Tiefpässen filtern [29]. Zusätzlich werden die Daten zur Verkleinerung der statistischen Fehler über mehrere Messwerte gemittelt. Dies setzt die Geschwindigkeit der Messung herab, so dass Lageänderungen des Elektronenstrahls nur mit einer maximalen Frequenz von 2.5 kHz messbar sind [30]. Aufgrund der Kontrollsystemanbindung (siehe Kapitel 6.6) ist die Auslesegeschwindigkeit zur Zeit jedoch auf 10 Hz begrenzt.


5.1.1. Genauigkeit und Kalibrierung

Die Genauigkeit der Strahllagemessung wird durch zwei Parameter festgelegt. Dies sind der Kalibrationsfaktor $a^b$ (Steigung) sowie ein konstanter Offset zum Nullpunkt [30].

Der Kalibrationsfaktor ist eine Funktion der Monitorgeometrie und innerhalb der baulich bedingten Streuung der Monitorköpfe als für alle Monitore identisch anzusehen. Er ist auf den Bergoz-Elektroniken fest eingestellt. In der Nähe des Symmetriepunktes des Monitorkopfes sind die Kalibrationsfaktoren $a^b$ in linearer Näherung konstant. Damit können die absoluten Stahlablagen im Bereich $x = \pm 5$ mm und $z = \pm 4$ mm auf 200 µm genau bestimmt werden [30]. Nach neueren Messungen ist jedoch anzunehmen, dass die zur Zeit eingestellten Kalibrationsfaktoren nicht korrekt sind, woraus sich ein zusätzlicher Messfehler im einstelligen Prozentbereich ergibt [19]. Die relative Genauigkeit wird durch die Auflösung der Analog-Digital-Wandler begrenzt und beträgt für die Bergoz-Elektroniken etwa $\pm 5$ µm und für die Libera-Elektroniken weniger als $\pm 1$ µm [19].

$^1$Sub-Miniature-A.
Nullpunktkalibrierung

Der Offset entspricht der mechanischen Einbaugenaugigkeit des Monitorkopfes in Relation zum angrenzenden Quadrupol. Nach Kapitel 4.4 definiert die magnetische Mitte eines Quadrupols den Designorbit und damit den Nullpunkt eines angrenzenden BPMs. Der Offset kann daher mit Hilfe der im Folgenden beschriebenen Methode der strahlbasierten Kalibrierung (Beam Based Calibration, BBC) bestimmt werden.

Nach Gleichungen 3.8 und 3.9 ist die durch einen Quadrupol verursachte Orbitstörung abhängig von dessen Stärke $k$ und von der transversalen Strahlablage im Quadrupol. Die Strahlablage in einem BPM ist nach Gleichung 4.7 proportional zur Änderung des Strahlwinkels am unmittelbar angrenzenden Quadrupol, der sich aus Gleichung 4.17 ergibt. Nun wird die Strahlablage im BPM mit Hilfe der Orbitkorrektur-Software (siehe Kapitel 5.3) geändert und jeweils die Orbitstörung aufgezeichnet, die sich durch eine definierte Änderung der Quadrupol-Stärke $k$ ergibt. Wird die Summe der quadrierten Ablagedifferenzen aller Monitore gegen die Strahllage am zu kalibrierenden BPM aufgetragen, ist eine Parabel zu erwarten, deren Minimum mit jener Strahllage am BPM korrespondiert, bei welcher der Quadrupol etwa entlang seiner magnetischen Mitte durchlaufen wird (Abbildung 8.6). Unter der Annahme, dass die Strahllagen an BPM und Quadrupol identisch sind, beide Elemente also nicht winklig durchlaufen werden, entspricht die Strahllage am Parabelminimum der gesuchten Nullpunktkalibration [17].

Um während der Messung die nichtlinearen Einflüsse auf den Strahl sowie die Kopplung der Teilchenbahnen in beiden Ebenen zu minimieren, sollte ein möglichst linearer Orbit eingestellt werden. Durch Annäherung an den Designorbit werden Winkeländerungen durch Quadrupole minimiert und die Sextupole nicht mehr mit einer großen Ablage durchlaufen. Insbesondere ist hierfür die mit den DC-Spulen aufgespannte Injektionsbeule abzuschalten (siehe Kapitel 5.2). Aufgrund der Magnetfelsaufstellung kann der Designorbit nicht komplett erreicht werden. Die Positionierung des Strahls in den Quadrupol-Zentren ist nur durch massiven Einsatz der Dipol-Korrektoren möglich (siehe Kapitel 5.3).

Mit dieser Methode ist eine maximale Kalibrationsgenauigkeit von $\pm 20$ bis $\pm 100 \mu m$ zu erreichen [30].

5.1.2. BPM-Positionen

Jeweils zwei BPMs befinden sich dipolseitig an den äußeren Quadrupolen der Tripletts. Nur die beiden Tripletts in den Symmetriepunkten der Bögen (an der Beschleunigungsstrecke und im Injektionsbereich) besitzen einen weiteren BPM am mittleren Quadrupol (bpm01 und
5. Messung und Korrektur der Strahllage

bpm28). Die restlichen BPMs sind nach Abbildung 5.2 auf die nicht in Tripletts angeordneten Quadrupole verteilt.

Abbildung 5.2: Positionen und Nomenklatur der Strahllagemonitore (bpm) im Speicherring Delta.

Die beschriebene Nullpunktkalibrierung mittels BBC ist nur an den 50 BPMs möglich, die sich direkt an einem Quadrupol befinden. Je zwei Monitore befinden sich abseits von Quadrupolen unmittelbar vor und hinter dem U250 (bpm14 und bpm15) und dem SAW (bpm40 und bpm41). Diese BPMs können daher nicht mittels BBC kalibriert werden.

Auch die in Kapitel 8 eingeführte strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen ist nur mit BPMs möglich, die sich an Quadrupolen befinden. Zusätzlich ist die Platzierung an den äußeren Quadrupolen der Tripletts Voraussetzung für diese Methode, was jedoch für alle Tripletts in Delta gegeben ist.
5.2. Dipol-Korrektormagnete

Zur gezielten Beeinflussung der Strahllage befinden sich im Speicherring 30 horizontale und 26 vertikale Korrektorspulen, die jeweils ein vertikales beziehungsweise horizontales Dipol-Feld erzeugen und somit den Strahl um einen einstellbaren Winkel

\[ \theta^c = \frac{e}{p} \int B(s) \, ds \quad (5.3) \]

ablenken können [82].


Abbildung 5.3: Spulen (blau) eines horizontalen (links) und eines vertikalen (rechts) Dipol-Korrektors an den Quadrupol-Jochen mit resultierenden magnetischen Feldlinien (grün) [17].

5.2.1. Genauigkeit

Die Bestromung der Korrektorspulen erfolgt über unipolare, stromgeregelte Netzgeräte mit Polwendern, die einen Maximalstrom von 10 A zur Verfügung stellen können. Die Differenz zwischen Setzwert und tatsächlichem Stromwert ist kleiner als 0.25 %, dabei kann der Ausgangsstrom bis auf ± 0.5 % konstant gehalten werden [47].

Die Genauigkeit der Dipol-Felder und damit auch der einstellbaren Kickwinkel beträgt, abhängig von der Länge des Quadrupol-Jochs, dem Vorhandensein eines integrierten Sextu-
5. Messung und Korrektur der Strahllage

Pols sowie der Bestromung des Quadrupols, zwischen 1.5 und 8 % [17]. Dieser Fehler ist daher dominierend, so dass der Netzgerätefehler vernachlässigt werden kann.

5.2.2. Sextupol-Komponenten der Korrektoren


Es ist weiterhin zu beachten, dass ein vertikaler Korrektor ein um \(\pm 90^\circ\) gedrehtes Sextupol-Feld erzeugt. Damit ändert sich die Wirkungsebene der Sextupol-Komponente nach Gleichungen 3.6 und 3.7, wobei das Vorzeichen von der Bestromung des Korrektors abhängt.

5.2.3. DC-Spulen

Um den Teilchenstrahl im Speicherring an den zu injizierenden Strahl aus dem Transferkanal heranzuführen, befinden sich in Delta fünf DC-Spulen, die eine statische Injektionsbeule mit einer horizontalen Strahlablage von bis zu 11 mm erzeugen können (siehe auch Kapitel 5.3). Die Spulen der dc1 und dc5 sind auf einem eigenen Magnetjoch angebracht. Die Spulen der dc2 und der dc4 sind als zwei mal 30 Zusatzwicklungen in je einen 20°-Dipol integriert. Die Spulen der dc3 befinden sich auf einem separaten Joch mit vier mal 300 Windungen.

Die Stromversorgung der dc4-Spulen erfolgt durch ein bipolares Netzgerät mit maximal \(\pm 20\,\text{A}\). Die übrigen DC-Spulen verfügen über jeweils ein unipolares Netzgerät mit einem Maximalstrom von \(\pm 45\,\text{A}\).

5.2.4. Korrektorpositionen

Die horizontalen Korrektoren sind in Delta hauptsächlich auf den langen Quadrupolen in den Mitten der 18 Triplets installiert. Zusätzlich sind 12 horizontale Korrektoren auf die kurzen Quadrupole außerhalb der Triplets verteilt.
18 der vertikalen Korrektoren befinden sich auf den äußeren, kurzen Quadrupolen der Tripletts, jedoch nicht auf allen. Die restlichen 9 Korrektoren befinden sich auf den kurzen Quadrupolen außerhalb der Tripletts.

In Abbildung 5.4 sind die Positionen der Korrektoren und der DC-Spulen im Speicherring verzeichnet.

**Abbildung 5.4:** Positionen der horizontalen (hk, blau) und vertikalen (vk, rot) Korrektoren sowie der DC-Spulen (dc) im Speicherring Delta.

Die Anzahl und Verteilung der Korrektoren sind für die Konstanthaltung des Sollorbits während des DELTA-Standardbetriebes optimiert (siehe Kapitel 5.3). Für die Erzeugung lokaler Strahlablagen und Winkel an beliebigen Stellen des Orbits (siehe Kapitel 5.3), wie es sowohl für die BPM-Kalibrierung (siehe Kapitel 5.1) als auch für die Messungen im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten Methode (siehe Kapitel 8) erforderlich ist, ist die Anzahl der Korrektoren nicht ausreichend. So sind beispielsweise während einer BBC an der Position des Korrektors vk19, der dabei für die Korrektur nicht zur Verfügung steht, mindestens vier Korrektoren zur Festlegung von Ablage und Winkel an dieser Position notwendig. Die benachbarten Korrektoren in dieser Ebene (eine beliebige Kombination aus vk16 bis vk22) sind bereits über ein Viertel des Speicherrings verteilt. Somit ist eine Messung an dieser Stelle nur zu Lasten der Orbitablagen in einem Großteil des Rings möglich, was wiederum an Stellen mit großen Betafunktionen zum Verlust des Strahls aufgrund der Aperturgrenzen führen kann. Für die in Kapitel 8 vorgestellte Methode bedeutet dies, dass die Messungen eventuell nicht an allen Quadrupolen durchgeführt werden können, wenn es nicht möglich ist, den Strahl dort den Anforderungen entsprechend auf den Designorbit zu korrigieren.
5. Messung und Korrektur der Strahllage

5.3. Orbitkorrektur

Der gewünschte Sollorbit im Speicherring kann unter Umständen vom Designorbit abweichen, um beispielsweise eine Injektionsbeule aufzuspannen. Der Sollorbit wird für den Delta-Standardbetrieb durch den Nutzerbetriebsorbit vorgegeben, der durch gezielte Orbitablagen und Winkel an den Quellpunkten der Synchrotronstrahlung die Richtung der Synchrotronstrahlungsfächer in den Strahllinien festlegt.


5.3.1. Response-Matrizen

Bei der Ablenkung des Strahls mit einem Korrektormagneten um einen Winkel \(\theta_c^j\) ergibt sich nach Gleichung 4.7 ein neuer Orbit mit den Strahlablagen \(\xi_b^i\) an den \(m = 54\) BPMs. Die mit Korrektor \(j\) am Ort \(s_j\) auf dem Orbit induzierte Strahlablage beträgt demnach an den \(i = 1 \ldots m\) BPMs an den Orten \(s_i\)

\[
\xi_b^i (s_i) = \theta_c^j \frac{\beta_b^{\xi_i} \cdot \beta_c^{\xi_j}}{2 \sin (\pi Q_\xi)} \cos \left( |\Psi_b^{\xi_i} - \Psi_c^{\xi_j}| - \pi Q_\xi \right) .
\]  

(5.4)

Darin sind \(\beta_b^{\xi_i}\) und \(\Psi_b^{\xi_i}\) die Betafunktionen und die Betatronphasen an den BPMs und \(\beta_c^{\xi_j}\) und \(\Psi_c^{\xi_j}\) die entsprechenden Funktionen am Korrektor, \(Q_\xi\) ist der Arbeitspunkt der jeweiligen Ebene.

Die gemessenen und auf den Ablenkwinkel normierten Orbitänderungen \(\xi_b^i / \theta_c^j\) können zu einem Spaltenvektor \(\vec{r}_j\), dem Orbit-Response-Vektor, zusammengefasst werden. Wird dieses

\(^2\)Zur Pseudoinversion mittels SVD-Verfahren siehe [17].
Verfahren für beide Ebenen mit jedem der \( j = 1 \ldots n \) Korrektoren wiederholt, so ergibt sich aus der Aneinanderreihung der \( n \) Spaltenvektoren die Orbit-Response-Matrix (ORM) [17]

\[
R = (\vec{r}_1 \vec{r}_2 \cdots \vec{r}_n).
\] (5.5)

Die einzelnen Elemente \( R_{ij} \) der ORM ergeben sich dann nach Gleichung 4.7 zu

\[
R_{ij} = \frac{\zeta^b_i \theta^c_j}{2 \sin (\pi Q \zeta)} \cos \left( |\Psi^b_{\zeta,i} - \Psi^c_{\zeta,j}| - \pi Q \zeta \right).
\] (5.6)

Response-Matrix-Messung


5.3.2. Lokale Orbitbeulen

Für die Injektionsbeule und für die Orbitkorrektur ist es notwendig, definierte Orbitablagen an vorgegebenen Positionen \( s \) zu erzeugen [78]. Dafür können lokale Orbitbeulen eingesetzt werden, in denen der Strahl mit Dipol-Korrektoren horizontal oder vertikal abgelenkt wird. Der Strahl wird dabei im einfachsten Fall zunächst mit einem Korrektor vom ungestörten Orbit abgelenkt und anschließend mit einem weiteren Korrektor zurück gelenkt. Um so eine abgeschlossene Beule zu erhalten, muss der zweite Korrektor genau im Phasenabstand \( \Delta \Psi = n \pi \) zum ersten Korrektor auf dem Orbit befinden.

Dreierbeulen

Aufgrund der Montage der Korrektorspulen auf den Quadrupol-Jochen, deren Abstände die oben genannte Phasenabstandsbedingung normalerweise nicht erfüllen, muss ein dritter Korrektor hinzugenommen werden. Die so erzeugten Orbitbeulen werden als Dreierbeulen bezeichnet.

3 Eine Orbitbeule ist abgeschlossen, wenn die Strahlage außerhalb der Beule nicht beeinflusst wird.
Nach der Ablenkung des Strahls durch den ersten Korrektor erzeugt der zweite eine weitere Winkeländerung, durch die der Strahl am Ort des dritten Korrektors wieder auf den ungestörten Orbit gelenkt wird. Der dritte Korrektor lenkt den Strahl dann wieder in Richtung des ursprünglichen Orbits ab (Abbildung 5.5).

Abbildung 5.5: Prinzip einer Orbitbeule am BPM mit drei Korrektorspulen $K_j$ [78].

Bei Dreierbeulen kann entweder die Ablage $\zeta$ oder der Winkel $\theta$ an einem Ort $s_0$ zwischen den Korrektoren $j = 1 \ldots 3$ vorgegeben werden. Wenn sich der Referenzpunkt $s_0$ beispielsweise zwischen dem ersten und dem zweiten Korrektor befindet, dann berechnen sich die Ablenkwinkel $\theta^c_j$, die zur Erzeugung einer abgeschlossenen Beule mit der vorgegebenen Ablage $\zeta$ am Ort $s_0$ erforderlich sind, nach Gleichung 3.24 zu [81]

\[
\theta^c_1 = \frac{\zeta}{\sqrt{\beta_{\zeta,0} \cdot \beta_{\zeta,1}}} \cdot \frac{1}{\sin (\Psi_{\zeta,0} - \Psi_{\zeta,1})},
\]

\[
\theta^c_2 = \frac{\zeta}{\sqrt{\beta_{\zeta,0} \cdot \beta_{\zeta,2}}} \cdot \frac{\sin (\Psi_{\zeta,1} - \Psi_{\zeta,3})}{\sin (\Psi_{\zeta,0} - \Psi_{\zeta,1}) \cdot \sin (\Psi_{\zeta,3} - \Psi_{\zeta,2})},
\]

\[
\theta^c_3 = \frac{\zeta}{\sqrt{\beta_{\zeta,0} \cdot \beta_{\zeta,3}}} \cdot \frac{\sin (\Psi_{\zeta,2} - \Psi_{\zeta,1})}{\sin (\Psi_{\zeta,0} - \Psi_{\zeta,1}) \cdot \sin (\Psi_{\zeta,3} - \Psi_{\zeta,2})},
\]

wobei $\beta_{\zeta,0}$ und $\Psi_{\zeta,0}$ die Betafunktion und die Betatronphase der Ebene $\zeta$ am Ort $s_0$ bezeichnen sowie $\beta^c_{\zeta,j}$ und $\Psi^c_{\zeta,j}$ die entsprechenden Funktionen an den Korrektoren.

Die notwendigen Dipol-Korrektorstärken errechnen sich aus den Ablenkwinkeln und den jeweiligen Korrektorlängen $l_{\text{eff},j}$ mit

\[
\frac{1}{R_j} = \frac{\theta^c_j}{l_{\text{eff},j}}.
\]

Viererbeulen

Normalerweise soll jedoch sowohl die Ablage $\zeta$ als auch der Winkel $\theta$ an einem Ort $s_0$ vorgegeben werden. Dazu kann das Verfahren mit einem weiteren Korrektor ergänzt werden.
Die Ablenkwinkel berechnen sich dann zu [81]

\[
\begin{align*}
\theta_1^c &= \frac{\zeta}{\sqrt{\beta_{\xi,0} \cdot \beta_{\xi,1}}} \cdot \cos \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,2} \right) - \alpha_{\xi,0} \cdot \sin \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,2} \right) - \theta \cdot \sqrt{\beta_{\xi,0} \cdot \beta_{\xi,1}} \cdot \sin \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,2} \right), \\
\theta_2^c &= \frac{\zeta}{\sqrt{\beta_{\xi,0} \cdot \beta_{\xi,2}}} \cdot \cos \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right) - \alpha_{\xi,0} \cdot \sin \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right) - \theta \cdot \sqrt{\beta_{\xi,0} \cdot \beta_{\xi,2}} \cdot \sin \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right), \\
\theta_3^c &= \frac{\zeta}{\sqrt{\beta_{\xi,0} \cdot \beta_{\xi,3}}} \cdot \cos \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right) - \alpha_{\xi,0} \cdot \sin \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right) - \theta \cdot \sqrt{\beta_{\xi,0} \cdot \beta_{\xi,3}} \cdot \sin \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right), \\
\theta_4^c &= \frac{\zeta}{\sqrt{\beta_{\xi,0} \cdot \beta_{\xi,4}}} \cdot \cos \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right) - \alpha_{\xi,0} \cdot \sin \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right) - \theta \cdot \sqrt{\beta_{\xi,0} \cdot \beta_{\xi,4}} \cdot \sin \left( \Psi_{\xi,0} - \Psi_{\xi,4} \right).
\end{align*}
\]

Darin bezeichnet \(\alpha_{\xi,0}\) die Steigung der Betafunktion am Ort \(s_0\) nach Gleichung 3.18. Mit diesen Viererbeulen können alternativ auch zwei Ablagen an zwei verschiedenen Orten vorgegeben werden. Auch eine Erweiterung auf mehr Korrekturen ist möglich, wodurch sich auch entsprechend mehr frei bestimmmbare Parameter (Ablagen oder Winkel) ergeben [78].

**Response-Beulen**

Die Ablenkwinkel \(\theta_j^c\) zur Erzeugung von Dreierbeulen lassen sich auch aus den Response-Vektoren der Korrekturen \(j = 1 \ldots 3\) berechnen. Die Bedingung für eine abgeschlossene Beule ist, dass die Superposition der Response-Vektoren außerhalb der lokalen Beule Null ergibt. Dazu werden die Vektoren \(\vec{p}_j\) definiert, die den Response-Vektoren \(\vec{r}_j\) entsprechen, in denen die Komponenten \(R_{ij}\) zu Null gesetzt werden, die zu dem BPM \(i\) gehören, der sich zwischen den äußeren Korrekturen befindet. Dann gilt [82]

\[
\begin{align*}
\theta_1^c &= \frac{\zeta}{R_1 + F_{12}R_2 + F_{13}R_3}, \\
\theta_2^c &= F_{12}\theta_1^c, \\
\theta_3^c &= F_{13}\theta_1^c,
\end{align*}
\]

mit

\[
F_{12} = \frac{\left( \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \right) \vec{p}_3 \cdot \vec{p}_3 - \left( \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_3 \right) \left( \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_3 \right)}{\left( \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_3 \right)^2 - \vec{p}_2^2 \vec{p}_3^2}
\]

und

\[
F_{13} = \frac{\left( \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_3 \right) \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_3 \cdot \vec{p}_3 - \left( \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \right) \left( \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_3 \right)}{\left( \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_3 \right)^2 - \vec{p}_2^2 \vec{p}_3^2}.
\]
5. Messung und Korrektur der Strahlage

Auch dieses Verfahren kann auf eine höhere Zahl an Korrektoren erweitert werden, um beispielsweise Viererbeulen zu erzeugen. Die Orbitkorrektur verwendet für die Strahlagekorrektur normalerweise nicht abgeschlossene globale Orbitbeulen, für die eine Superposition aller Dipol-Korrektoren im Speicherring verwendet wird\textsuperscript{4}.

\textsuperscript{4}Für eine ausführliche Beschreibung des aktuell implementierten Orbitkorrekturverfahrens siehe [17].
6. Weitere Komponenten des Speicherrings

6.1. Beschleunigungsstrecken

Um den Energieverlust durch die Abstrahlung der Synchrotronstrahlung auszugleichen, werden Beschleunigungsstrecken in Form von Hohlraumresonatoren eingesetzt. In diesen wird durch Einspeisung eines hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes eine stehende Welle mit der Frequenz $f_{HF}$ erzeugt, dessen elektrische Feldkomponente parallel zum Designorbit verläuft.

In Delta wird ein Hohlraumresonator mit $f_{HF} \simeq 499.820$ MHz und einer Auflösung von 0.1 Hz eingesetzt. Der Hohlraumresonator ist mit einem elektromechanischen Abstimmstempel ausgestattet, welcher den Resonator über eine elektronische Regelung auf Resonanz hält, wenn sich das Volumen durch Temperaturänderungen des Materials ändert [20].

6.2. Insertion Devices


Beim Undulator kommt es aufgrund kleiner Amplituden der Transversalbewegung zur Interferenz der Strahlungskeulen. Dadurch wird kohärente Synchrotronstrahlung mit einem scharfen Spektrum und hoher Brillanz abgestrahlt, dies jedoch aufgrund schwächer ablenkender Magnetfelder mit relativ geringer Photonenenergie.

Im Wiggler werden die Teilchen mit Hilfe starker Magnetfelder weit ausgelenkt, um eine hohe Photonenenergie zu erreichen. Die erzeugten Synchrotronstrahlungskeulen überlagern sich dadurch nicht, wodurch das Spektrum der erzeugten Strahlung relativ breit ist.
6. Weitere Komponenten des Speicherrings

Der Übergang zwischen Undulator und Wiggler ist fließend und wird durch die dimensionslose Undulator-Stärke \( K \) beschrieben [41, 76]:

\[
K = \frac{e \cdot B_U \cdot \lambda_U}{2 \cdot \pi \cdot m_0 \cdot c}.
\] (6.1)

Darin sind \( e \) die Elementarladung, \( B_U \) die Magnetfeldstärke, \( \lambda_U \) die Periodenlänge der Magnetstruktur des Undulators oder Wigglers, \( m_0 \) die Ruhemasse des Elektrons und \( c \) die Lichtgeschwindigkeit. Einer gebräuchlichen Definition zufolge handelt es sich bei einer Undulatorstärke \( K \leq 1 \) um einen Undulator, anderenfalls um einen Wiggler.

Die Dipole in den Insertion Devices erzeugen jeweils eine Kantenfokussierung. Dies führt zu einer Änderung \( \Delta \Psi_z \) der vertikalen Betatronphase und damit zu einer Verschiebung des vertikalen Arbeitspunktes um [41]

\[
\Delta Q_z = \frac{\pi \cdot l \cdot \langle \beta_z \rangle \cdot K^2}{2 \cdot \lambda_U^2 \cdot \gamma^2_E}.
\] (6.2)

Darin bezeichnet \( l \) die Länge des Undulators, \( \langle \beta_z \rangle \) die mittlere vertikale Betafunktion im Bereich des Undulators, \( K \) die Undulator-Stärke, \( \lambda_U \) die Periodenlänge und

\[
\gamma_E = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E}{m_0 \cdot c^2}
\] (6.3)

den relativistischen Geschwindigkeitsfaktor (Lorentz-Faktor) der Elektronen mit der Energie \( E \). Durch Einsetzen von Gleichungen 6.1 und 6.3 in Gleichung 6.2 ergibt sich die durch ein Insertion Device hervorgerufene Verschiebung des vertikalen Arbeitspunktes zu [50]

\[
\Delta Q_z = 3.58 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{B_U}{E} \right)^2 \cdot l \cdot \langle \beta_z \rangle.
\] (6.4)

Dabei werden \( B_U \) in Tesla, \( l \) und \( \langle \beta_z \rangle \) in Meter sowie \( E \) in GeV eingesetzt.

Horizontal beträgt die Arbeitspunktdifferenz für Standardundulatoren mit vertikalem Feld immer \( \Delta Q_x = 0 \).

**Insertion Devices in Delta**

Für eine Energie von \( E = 1485 \text{ MeV} \) ergibt sich \( \Delta Q_z = 0.0088 \) für den U55 und \( \Delta Q_z = 0.0009 \) für den U250. Der Einfluss der Undulatoren auf den Gesamtstrahl ist somit vernachlässigbar.

Bei einer maximalen Spulenerregung des SAW von \( B_U = 5.3 \text{ T} \) im asymmetrischen Wiggler-Modus ergibt sich für eine Energie von \( E = 1485 \text{ MeV} \) \( \Delta Q_z = 0.20 \). Aufgrund der deutlichen Verschiebung des vertikalen Arbeitspunktes muss dieser in der Standardoptik jeweils für den Betrieb mit und ohne SAW angepasst werden. Dazu wird die Fokussierung der Quadrupol-Familien qf und qd in den Bögen des Speicherrings (Abbildung 4.8) entsprechend variiert.
6.3. Vakuumkammer

Die DELTA-Vakuumkammern bestehen aus 3 mm starkem nichtmagnetischem Edelstahl und haben an den meisten Stellen einen schlüssellochförmigen Querschnitt (Abbildung 6.1). Die eigentliche Strahlkammer, in der die Elektronen geführt werden, ist der äußere achteckige Teil. Dieser hat eine mechanische Apertur von maximal $\pm 37$ mm horizontal und $\pm 20$ mm vertikal und ist über einen 8 mm hohen und 35 mm breiten Pumpkanal mit dem inneren Teil, der Pumpkammer, verbunden. In der Pumpkammer sind Vakuumpumpen$^1$ integriert, die bei 100 mA Strahlstrom einen Vakuumdruck von etwa $2 \cdot 10^{-7}$ Pa erzeugen können [17].

Abbildung 6.1: Lage und Form der Vakuumkammer (rot) im Quadrupol (Blick entgegen der Strahlrichtung).

Um die thermische Ausdehnung der Vakuumkammer zu minimieren, die insbesondere während des Speicherbetriebes durch die Bestrahlung der äußeren Kammerwand mit Synchrotronstrahlung verursacht wird, wird die Kammer mit Wasser gekühlt, das durch einen an der Außenseite der Kammer angebrachten Kühlkanal geführt wird. Außerdem ist die Strahlkammer longitudinal in Teilstücke aufgeteilt, die durch Faltenbälge miteinander verbunden sind. Diese ermöglichen der Kammer einen begrenzten longitudinalen Spielraum, um die thermische Ausdehnung kompensieren zu können.

$^1$Hierfür werden Ionengetterpumpen eingesetzt, welche die Restgasmoleküle durch Elektronenstoß ionisieren und durch ein elektrisches Feld auf eine Oberfläche beschleunigen, an welcher sie chemisch gebunden werden [76].
6. Weitere Komponenten des Speicherrings

6.3.1. Fixierung der Vakuumkammer

Die Strahlkammer liegt in den Dipolen und Quadrupolen auf den unteren Polschuhen auf. Um die Kammer in den Quadrupolen zu zentrieren, besitzen die Monitorköpfe der BPMs eine Wulst\(^2\), welche einen äquidistanten Abstand der Kammer zu den vier Polschuhen des unmittelbar angrenzenden Quadrupols gewährleisten soll (siehe auch Abbildung 6.1).

Dabei kommen zwei Typen von Monitorköpfen zum Einsatz. Bei BPMs des fixierten Typs hat der Monitorkopf $\pm 0.07$ mm Spielraum im Quadrupol (Abbildung 6.2). Zusätzlich sind verteilt über den Speicherring auch BPMs des variablen Typs mit einem Spielraum von $\pm 1.8$ mm eingebaut worden, um der Kammer mehr Freiraum zum Ausgleich thermischer Spannungen zu geben. Da sich dies als nicht ausreichend herausgestellt hat, wurden die Wülste an einigen Monitorköpfen abgefräst, um den Spielraum auf mehr als $\pm 2$ mm zu erhöhen [60].


\(^2\)Abweichend davon sind die Elektroden der BPMs 40 und 41 in die Strahleinlass- und Strahlauslasskammer des SAW eingelassen worden.
6.3. Vakuumkammer

6.3.2. Verschiebung der Vakuumkammer

Der Spielraum kann durch weitere Faktoren eingeschränkt sein. An manchen Stellen wird die Vakuumkammer durch die internen Sextupol-Spulen vertikal fixiert. An vielen Stellen ist die Kammer durch mechanische Spannungen zwischen zwei Polen einer Quadrupolspule festgeklemmt.

Diese Spannungen werden auch durch longitudinale Verschiebungen verursacht, die durch das Zusammenziehen der Kammerstücke beim Evakuieren entstehen können [59], da die Vakuumkammer in den Dipolen dem Strahlverlauf entsprechend gekrümmt ist (Abbildung 6.3).


Es ist in der Tat zu beobachten, dass manche Faltenbälge komplett zusammen gestaucht sind, während andere weiter auseinander gezogen sind. Durch die longitudinale Verschiebung entsteht so eine Hebelwirkung, welche die Kammer entweder gegen die inneren oder die äußeren Polschuhe der Quadrupole drückt. Dies kann wiederum zu einer Verschiebung der Quadrupole führen. Wie der Tabelle in Anhang A.2 zu entnehmen ist, haben sich die Quadrupol-Tripletts tatsächlich um den Speicherring nach innen und außen verschoben (Abbildung 6.4).
6.4. Indukte Wegaufnehmer

Um Bewegungen der Vakuumkammer oder der Magnete detektieren und über längere Zeiträume hinweg aufzeichnen zu können, werden Wegaufnehmer vom Typ IW 15A/5-0,25-S-T der Firma TWK-ELEKTRONIK eingesetzt, die mittels eines Tastkopfes Bewegungen desselben induktiv erfassen. Der abgerundete Tastkopf ist dazu auf eine nicht magnetische Messstange aufgeschraubt, die an ihrem Ende im Innern des Gehäuses einen magnetischen Kern besitzt. Der Kern taucht in zwei Spulen ein, die in Form einer Differentialdrossel gegenphasig in Reihe geschaltet sind, so dass sich die Messspannungen subtrahieren und sich in der Mittelstellung des Kerns zwischen den Spulen gerade aufheben. Die Spannungen werden von einer integrierten Elektronik ausgewertet, welche wiederum ein Signal von 0 bis 10 V ausgibt, das einer Bewegung des Tastkopfes von 0 bis 5 mm entspricht.

Die Genauigkeit des eingesetzten Typs beträgt laut technischem Datenblatt 0.25 %, die Restwelligkeit des Signals ist mit ± 5 mV angegeben. Bei maximalem Messhub entspricht dies jeweils einer absoluten Genauigkeit von ± 12.5 µm. Die maximale Messfrequenz beträgt 100 Hz. Die Temperaturdrift ist mit ≤ 0.008 %/°C angegeben.

Abbildung 6.4 zeigt einen Wegaufnehmer, der auf einer Messsäule montiert ist, um die Bewegung eines Quadrupols relativ zum Hallenboden zu beobachten.

Die Winkelgenauigkeit eines Theodoliten beträgt normalerweise etwa ± 10″ [76]. Für genauere Messungen, die im Rahmen der auch bei DELTA angewandten Ingenieurgeodäsie erforderlich sind, kommen Präzisionstheodoliten mit einer Auflösung von bis zu ± 1″ zum Einsatz (siehe auch Abbildung 6.7).

Eine systeminmanente Begrenzung der Messgenauigkeit optischer Triangulationsverfahren ist durch die Refraktion⁴ gegeben. Bei den relativ kurzen Abständen von wenigen Metern im Speicherring Delta ist diese jedoch zu vernachlässigen, da die Messgenauigkeit dann

³Triangulation bezeichnet die Berechnung der Seitenlängen eines Dreiecks bei Kenntnis der Dreieckswinkel.
⁴Die Refraktion beschreibt die Krümmung des Lichtstrahls durch unterschiedlich warme Luftschichten.
6. Weitere Komponenten des Speicherrings

bei Normaldruck mit unter ± 10 µm immer noch besser als die geforderte Genauigkeit der Magnetaufstellung von ± 100 µm ist [46, 4, 59].

**Anwendung und Genauigkeit der geodätischen Vermessungen bei DELTA**


Ein kompletter Aufbau für die horizontale Vermessung eines Quadrupol-Tripletts ist in Abbildung 6.7 zu sehen.

Für die Höhenmessung werden separate Nivelliergeräte [25] eingesetzt, die eine Nivellierlatte mit Referenz zum Hallenboden anpeilen.

6.6. Kontrollsystem


---

5Industriestandard IEEE 802.3.
7Versatile Module Europe, Industriestandard IEEE 1014.
8Input-Output-Controller.
9Controller Area Network, Industriestandard ISO 11898.
10General Purpose Interface Bus, Industriestandard IEEE 488.
11Experimental Physics and Industrial Control System.

\textsuperscript{12}Prozessvariablen sind Messwerte, Setzwerte und davon abgeleitete Größen. Die Geschwindigkeit der Datenübertragung im Kontrollsystem ist aufgrund der maximalen Auslesegeschwindigkeit der EPICS-Records auf maximal 10 Hz limitiert.

\textsuperscript{13}Tool Command Language.
7. Modellierung des Speicherrings

Sowohl für die in Kapitel 8 eingeführte strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen als auch zum besseren Verständnis des Strahlverhaltens im Speicherring ist es notwendig, das Modell des Speicherrings soweit anzupassen, dass es die Realität möglichst genau widerspiegelt. Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit ist insbesondere die Berechnung von relativen Orbitablagen erforderlich. Im Allgemeinen sind auch die absoluten Strahlablagen von Interesse sowie die Berechnung der Arbeitspunkte und Chromatizitäten.

In Kapitel 7.1 wird kurz auf das bisher standardmäßig verwendete Modell eingegangen, bevor in Kapitel 7.2 die im Rahmen dieser Arbeit eingeführten Änderungen besprochen werden. Dazu werden zunächst die Einflüsse dieser Änderungen auf das Designmodell präsentiert, in dem alle Dipol-Korrektoren und DC-Spulen feldfrei sind. Im Anschluss werden die Simulationen in Kapitel 7.3 basierend auf gespeicherten Magnet-Setups inklusive der Dipol-Korrektoren und DC-Spulen durchgeführt und die Ergebnisse mit gemessenen Strahlparametern verglichen.

7.1. MAD-Modell

Bisher wurde für die Modellierung des Speicherrings Delta unter anderem das Software-Paket MAD\(^1\) eingesetzt. Dieses wird über textbasierte Eingabedateien gesteuert, welche die Magnetstruktur (Positionen, effektive Längen, etc.) und die Magnetstärken enthalten. Die Erstellung der Eingabedateien kann manuell oder mit Hilfe von externen Skriptprogrammen erfolgen. MAD sucht anschließend die Lösung für den Gleichgewichtsorbit und berechnet die gesuchten Strahlparameter (Orbitablagen, Betafunktionen, Dispersion, Arbeitspunkte, etc.) mit Hilfe der Matrizenoptik. Das Software-Paket enthält noch weitere Möglichkeiten zur Simulation des Strahlverhaltens, wie das Teilchentracking, die jedoch nicht verwendet worden sind und an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden. Um die genutzten und weitergehende Funktionalitäten einfacher implementieren und steuern zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Wechsel zum Industriestandard-Software-Paket MATLAB der Firma The MathWorks [37] vollzogen, welcher im Folgenden näher beschrieben wird.

\(^1\)Methodical Accelerator Design, Version 8.13 [28].
7. Modellierung des Speicherrings

7.2. Implementation in MATLAB


Abbildung 7.1: Mit MAD 8 simulierte Strahlparameter, Designmagnetstruktur (1.5 GeV, SAW ausgeschaltet, Korrektoren und DC-Spulen feldfrei). Graphen identisch mit denen der AT-Simulation.

Ein Vergleich der Arbeitspunkte zeigt erst in der vierten Nachkommastelle eine marginale Abweichung. Bei den Chromatizitäten sind jedoch größere Unterschiede erkennbar, die sich vor allem vertikal bemerkbar machen (siehe Tabelle 7.1).

---

2 Accelerator Toolbox, die aktuelle Version ist Teil des Matlab Middle Layer Paketes (MML) [45] und wird, basierend auf Version 1.3 [67], laufend aktualisiert.
7.2. Implementation in MATLAB

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>MAD</th>
<th>AT</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>(Q_x)</td>
<td>9.1906</td>
<td>9.1907</td>
</tr>
<tr>
<td>(Q_z)</td>
<td>3.2785</td>
<td>3.2780</td>
</tr>
<tr>
<td>(\xi_x)</td>
<td>1.5311</td>
<td>1.3552</td>
</tr>
<tr>
<td>(\xi_z)</td>
<td>-0.9619</td>
<td>0.1329</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Tabelle 7.1: Vergleich der simulierten Strahlparameter von MAD und AT, Designmagnetstruktur (1.5 GeV, SAW ausgeschaltet).

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nicht abschließend geklärt werden, wie dieser Unterschied entsteht. Beide Software-Programme berechnen die Chromatizitäten nach Gleichung 4.24, indem eine Dispersionsbahn mit bekannter Impulsabweichung simuliert und die Arbeitspunktdifferenz zur Bahn ohne Impulsabweichung berechnet wird. Die Dispersionen beider Programme stimmen jedoch, wie erwähnt, sehr gut überein. Der Ursprung der Abweichungen bleibt daher unklar und eine weitere Untersuchung wäre wünschenswert.

7.2.1. Teilchentracking

Als Teilchentracking wird die abschnittsweise Transformation des Phasenraumvektors durch die einzelnen Elemente der Magnetstruktur bezeichnet. Die \( \text{AT} \) trackt den sechsdimensionalen Phasenraumvektor

\[
\vec{r} = \begin{pmatrix}
x \\
x' \\
z \\
z' \\
p - p_0 \\
p \\
\Delta l
\end{pmatrix}
\]

(7.1)

eines Teilchens durch die Optik. Der Term \( p - p_0 \) beschreibt die Impulsabweichung des Teilchens, \( \Delta l \) bezeichnet die Strecke, die das Teilchen zurücklegt; \( \Delta l \) entspricht im Idealfall der Strecke \( s - s_0 \) auf dem Designorbit. Für den Phasenraumvektor können Startwerte vorgegeben werden, mit denen dieser dann über eine beliebige Anzahl von Umläufen durch den Ring getrackt wird.

Zusätzlich kann die \( \text{AT} \) auch nach der Lösung für den Gleichgewichtsorbit suchen, was auch für die Simulationen im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde. Dazu wird zunächst durch Multiplikation der Transformationsmatrizen aller Elemente im Speicherring eine Umlaufmatrix \( M_{\text{Umlauf}} \) aufgestellt. Ausgehend von einem beliebigen Startvektor (normalerweise \( (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \)) wird mit Hilfe des numerischen Verfahrens der Fixpunktitration\(^3\) der Pha-

\(^3\)Siehe beispielsweise [76].
7. Modellierung des Speicherrings

senraumvektor bestimmt, der durch Transformation mit der Umlaufmatrix identisch bleibt (Periodizitätsbedingung). Dieses Verfahren kann auf zwei verschiedene Arten durchgeführt werden: Entweder unter der Randbedingung, dass \( \frac{p_{\text{p}} - p_{\text{p}0}}{p} \) konstant bleibt (und die Randbedingung einer konstanten Umlauflänge \( t_{\text{Orbit}} \) vernachlässigt wird) oder unter der Randbedingung, dass die Längendifferenz \( \Delta l_{\text{Orbit}} \), die sich nach der Transformation mit der Umlaufmatrix ergibt, der Differenz zwischen realer Bahnlänge \( c \cdot \tau \) und Designlänge \( L \) entspricht. Die reale Bahnlänge ergibt sich dabei aus dem Produkt der Lichtgeschwindigkeit mit der Umlaufzeit \( \tau \), die wiederum der inversen Umlauffrequenz \( 1/f_{\text{Umlauf}} \) entspricht. Diese kann mit der Beziehung

\[
\frac{1}{f_{\text{Umlauf}}} = \frac{H}{f_{\text{HF}}}
\]  

(7.2)

aus der Cavityfrequenz \( f_{\text{HF}} \) und der Harmonischenzahl \( H \) berechnet werden⁴.

Der zweite Fall ist realitätsnäher, da sich der Teilchenimpuls und damit die Bahnlänge der Hochfrequenz im Cavity anpasst⁵. Hierfür ist jedoch eine Berücksichtigung des Cavities und der Synchrotronstrahlungsverluste im Modell notwendig. Aufgrund der in den nächsten Kapiteln beschriebenen großen Abweichungen zwischen simuliertem und realem Orbit war dies jedoch nicht möglich, da bei Berücksichtigung dieser Faktoren kein Gleichgewichtsorbit gefunden werden konnte. Daher konnte im Rahmen dieser Arbeit nur die erste Möglichkeit genutzt werden. In diesem Fall darf jedoch kein Cavity oder ein anderes den Teilchenimpuls beeinflussendes Element im Modell definiert sein.

Für das Tracking berechnet die \( \text{AT} \) numerisch⁶ den integralen Einfluss des Magnetfeldes auf den Stahl, indem sie für jeden Magneten dessen effektive Länge in eine einstellbare Anzahl (üblicherweise zehn) von nichtausgedehnten Kicks zerlegt, die durch äquidistante Driftstecken getrennt sind. Auf diese Weise können auch nichtlineare Einflüsse der Optik auf den Strahl berechnet werden, die erst nach vielen Umläufen sichtbar werden, wie die Einschränkung der dynamischen Apertur durch Sextupole (siehe Kapitel 4.5). Diese Einflüsse können dazu führen, dass Teilchen, die sich über wenige Umläufe auf scheinbar stabilen Bahnen bewegen, nach einiger Zeit auf chaotische Bahnen geraten und verloren gehen [72].


⁴Die Harmonischenzahl ergibt sich aus der Bedingung, dass die Hochfrequenz im Cavity ein Vielfaches der Umlauffrequenz sein muss, damit ein Teilchen immer in der gleichen Phase der Cavityfrequenz beschleunigt wird [78].
⁵Siehe Dispersionsbahnen in Kapitel 3.2 und Phasenfokussierung in [78].
⁶Die \( \text{AT} \) rechnet zu diesem Zweck mit symplektischen Integratoren. Siehe hierzu beispielsweise [77].


7.2. Funktionale Erweiterungen

7.2.2. Schnittstellen


Es wurden weiterhin Importfunktionen geschaffen, um gespeicherte Magnet-Setups in verschiedenen Formaten einlesen und als Grundlage von Simulationen verwenden zu können. Dazu werden die Magnetstärken aus den Stromsetzwerten der jeweiligen Netzgeräte berechnet.

Magnetstärkenberechnung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Software-Bibliothek i2k auf MATLAB migriert, um die Magnetströme direkt in energieabhängige Magnetstärken umrechnen zu können und umgekehrt. Dabei wurden erstmals auch die in Tabelle 4.2 dokumentierten Kalibrationsfaktoren für die Quadrupol-Netzgeräte berücksichtigt, indem die Ströme vor der Umrechnung mit i2k um die entsprechenden Kalibrationsfaktoren korrigiert werden. Bei Simulationen, die
von gespeicherten Magnet-Setups ausgehen, zeigte sich, dass die simulierte Optik ohne die Berücksichtigung der Kalibrationsfaktoren so stark von der Realität abweicht, dass kein Gleichgewichtsorbit gefunden werden kann. Daher werden die Kalibrationsfaktoren bei allen Simulationen in Kapitel 7.3 berücksichtigt.

7.2.2.2. Vermessungsdaten


<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>O</th>
<th>L</th>
<th>L, T</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$Q_x$</td>
<td>9.1907</td>
<td>9.1904</td>
<td>9.1592</td>
</tr>
<tr>
<td>$Q_z$</td>
<td>3.2780</td>
<td>3.2776</td>
<td>3.3323</td>
</tr>
<tr>
<td>$\xi_x$</td>
<td>1.3270</td>
<td>0.5205</td>
<td>−3.1641</td>
</tr>
<tr>
<td>$\xi_z$</td>
<td>0.5036</td>
<td>−0.3486</td>
<td>−2.0386</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Tabelle 7.2: Vergleich der mit der AT simulierten Strahlparameter ohne (O) und mit Berücksichtigung der longitudinalen (L) sowie der longitudinalen und transversalen (L, T) Positions korrekturen (1.5 GeV, SAW ausgeschaltet).

Die entsprechenden Betafunktionen, Orbit-Ablagen und Chromatizitäten für beide Simulationen sind in den Abbildungen 7.2 und 7.3 dargestellt.
Abbildung 7.2: Mit der AT simulierte Strahlparameter, Designmagnetstruktur mit Berücksichtigung der longitudinalen Positionskorrekturen aus den Vermessungsdaten (1.5 GeV, SAW ausgeschaltet, Korrektoren und DC-Spulen feldfrei, keine transversalen Positionskorrekturen).

Abbildung 7.3: Mit der AT simulierte Strahlparameter, Designmagnetstruktur mit Berücksichtigung der longitudinalen und transversalen Positionskorrekturen aus den Vermessungsdaten (1.5 GeV, SAW ausgeschaltet, Korrektoren und DC-Spulen feldfrei).
7. Modellierung des Speicherrings

Die longitudinalen Positionskorrekturen haben nur eine geringe Auswirkung auf die Arbeitspunkte, da die Positionen der Quadrupole nur wenig verändert wurden. Die Chromatizitäten unterscheiden sich, da die internen Sextupole hier nicht mehr als dünne Linsen sondern als über die Länge der Quadrupole ausgedehnte Magnete betrachtet werden. Die transversalen Positionskorrekturen sorgen für große Strahlablagerungen in den Quadrupolen und Sextupolen, was erwartungsgemäß einen deutlichen Einfluss auf die Arbeitspunkte und Chromatizitäten hat. Es ist zu erkennen, dass die Betafunktionen vor und hinter dem FEL aufgrund der Quadrupol-Kickwinkel eine starke Asymmetrie aufweisen.

7.2.2.3. Multipolkomponenten

Die magnetischen Multipolkomponenten der Dipole, Quadrupole und Sextupole wurden entnommen. Darin wurde von jedem Magnettypen ein Magnet exemplarisch vermessen. Für die einzelnen in Delta eingebauten Magnete liegen keine Messwerte für die konstruktionsbedingten Abweichungen der Magnetfelder von den Designwerten vor. Die exemplarischen Messdaten werden daher näherungsweise jeweils für alle Magnete eines Typs angesetzt.

Die Dipol-Korrektoren waren zwar im MAD-Modell definiert, wurden jedoch bisher nicht in die Simulationen mit einbezogen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, die damit erzeugten realen Orbitablagerungen zu reproduzieren. Die Ergebnisse werden in Kapitel 7.3 präsentiert.

Höhere Multipolkomponenten der Korrektoren

Da die Feldvermessungen der Dipol-Korrektoren gezeigt haben, dass diese nicht vernachlässigbare Sextupol-Anteile aufweisen (siehe Kapitel 5.2), wurden diese erstmals in das Modell eingefügt.

Die sättigungsabhängigen integralen Sextupol-Stärken \( m_{\text{Korr}} \) können mit Hilfe der integralen Korrektorstärken \( \theta_{\text{Korr},0} \) für \( I_{\text{Quad}} = 0 \) und der integralen Sextupol-Stärken \( m_{\text{Korr},0} \) für \( I_{\text{Quad}} = 0 \) aus den sättigungsabhängigen integralen Korrektorstärken \( \theta_{\text{Korr}} \) berechnet werden:

\[
m_{\text{Korr}} = m_{\text{Korr},0} \frac{\theta_{\text{Korr}}}{\theta_{\text{Korr},0}}.
\]

(7.3)

Die Werte für \( \theta_{\text{Korr},0} \) und \( m_{\text{Korr},0} \) sind [17] entnommen und in den Tabellen 7.3 und 7.4 aufgeführt.

7 Zur Erklärung der unterschiedlichen Chromatizitäten in Spalte O und in Tabelle 7.1 siehe Bemerkung am Ende von Kapitel 7.2.
8 Vergleiche hierzu auch die Untersuchungen in [34].
7.2. Implementation in MATLAB

Langer horizontaler Korrektor ohne Sextupol 0.472
kurzer horizontaler Korrektor ohne Sextupol 0.479
langer horizontaler Korrektor mit externem Sextupol 0.447
kurzer horizontaler Korrektor mit externem Sextupol 0.441
kurzer vertikaler Korrektor ohne Sextupol 0.192
kurzer vertikaler Korrektor mit externem Sextupol 0.175

Tabelle 7.3: Integrale Korrektorstärken / \((10^{-3} \cdot \text{rad} \cdot \text{GeV} \cdot \text{A}^{-1})\) für \(I_{\text{Quad}} = 0\).

kurzer horizontaler Korrektor 0.416
langer horizontaler Korrektor 0.478
kurzer vertikaler Korrektor 0.169

Tabelle 7.4: Integrale Sextupol-Stärken / \((m^{-2} \cdot \text{GeV} \cdot \text{A}^{-1})\) für \(I_{\text{Quad}} = 0\).

Eine testweise Berücksichtigung von weiteren Multipolkomponenten der Korrektoren bis zur siebten Ordnung (Tetradekapole) zeigte keine signifikanten Abweichungen der Strahlparameter, insbesondere der Orbitablagen, gegenüber dem Standardmodell, das nur Multipolkomponenten bis zur dritten Ordnung (Sextupole) enthält. In Abbildung 7.4 sind die Betafunktionen, Orbitablagen und Dispersionen für eine typische Kickstärke von von 0.1 mrad an hk01 unter Berücksichtigung der Multipolkomponenten bis einschließlich zur siebten Ordnung in der Designmagnetstruktur dargestellt. Tabelle 7.5 enthält einen Vergleich der entsprechenden Arbeitspunkte und Chromatizitäten.

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>1.</th>
<th>3.</th>
<th>7.</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>(Q_x)</td>
<td>9.1932</td>
<td>9.1934</td>
<td>9.1934</td>
</tr>
<tr>
<td>(Q_z)</td>
<td>3.2774</td>
<td>3.2774</td>
<td>3.2774</td>
</tr>
<tr>
<td>(\xi_x)</td>
<td>1.3608</td>
<td>1.5331</td>
<td>1.5353</td>
</tr>
<tr>
<td>(\xi_z)</td>
<td>−0.0746</td>
<td>−0.0916</td>
<td>−0.0917</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Tabelle 7.5: Vergleich der mit der AT simulierten Strahlparameter für einen Kickwinkel von 0.1 mrad an hk01 unter Berücksichtigung aller Multipolkomponenten der Korrektorspulen jeweils bis einschließlich der ersten (Dipol), dritten (Sextupol) und siebten (Tetradekapol) Ordnung (1.5 GeV, SAW ausgeschaltet).

Auf eine Darstellung der Betafunktionen, Orbitablagen und Dispersionen nur bis zur ersten und bis einschließlich zur dritten Ordnung wurde verzichtet, da diese sich qualitativ nicht von Abbildung 7.4 unterscheiden und die quantitativen Unterschiede so gering sind, dass sie in den Graphen nicht erkennbar sind.
7. Modellierung des Speicherrings

Abbildung 7.4: Mit der AT simulierte Strahlparameter für einen Kickwinkel von 0.1 mrad an hk01 unter Berücksichtigung aller Multipolkomponenten der Korrektorspulen bis einschließlich der siebten Ordnung (Tetradekapole) (1.5 GeV, SAW ausgeschaltet, restliche Korrektoren und DC-Spulen feldfrei).

Bei Berücksichtigung der Sextupol-Komponenten ist eine äußerst geringe Änderung des horizontalen Arbeitspunktes erkennbar, vertikal ist keine Änderung ersichtlich. Die Chromatizitäten ändern sich ebenfalls nur geringfügig. Bei Berücksichtigung aller Korrektoren mit ihren jeweiligen realen Kickwinkeln summieren sich diese Änderungen jedoch auf, so dass sie nicht vernachlässigt werden können. Eine weitergehende Untersuchung des Einflusses der realen Sextupol-Komponenten erfolgt in Kapitel 7.3.3.

Wenn zusätzlich die Tetradekapol-Komponenten berücksichtigt werden, ist nur noch eine Änderung der Chromatizitäten in der dritten beziehungsweise vierten Nachkommastelle zu erkennen. Aufgrund dieser Untersuchungen wurden in den weiteren Berechnungen nur Multipolkomponenten bis einschließlich zur dritten Ordnung (Sextupole) berücksichtigt.

**Sextupol-Komponenten der Dipol-Randfelder**

Im ursprünglichen MAD- sowie im ersten MATLAB-Modell sind theoretische Werte für die Sextupol-Stärken der Dipol-Randfelder verwendet worden. Um die Genauigkeit des Modells zu erhöhen, wurden für die Berechnung aller in dieser Arbeit aufgeführten Chromatizitäten

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>MAD</th>
<th>AT</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>( m_{20} )</td>
<td>(-0.15)</td>
<td>(-0.225)</td>
</tr>
<tr>
<td>( m_7 )</td>
<td>(-0.04)</td>
<td>(-0.18)</td>
</tr>
<tr>
<td>( m_3 )</td>
<td>(-0.02)</td>
<td>(-0.15)</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Tabelle 7.6: Vergleich der Sextupol-Komponenten \( m \) in den Randfeldern der Dipole (20°, 7°, 3°) im ursprünglichen MAD-Modell und im angepassten AT-Modell.

7.3. Ergebnisse der Simulation

Nach Gleichungen 4.14 ist die Auswirkung einer Quadrupol-Stärkenänderung auf die Betafunktionen und damit auf die Strahlbreiten im gesamten Speicherring abhängig von der Größe der Betafunktion am Ort des Quadrupols. Daher reagieren manche Quadrupol-Magnete empfindlicher auf kleine Änderungen des Erreignstromes als andere. Einige Quadrupole können problemlos um mehrere Prozent verstellt werden, während bei anderen schon eine Änderung im Sub-Prozent-Bereich zu einem Strahlverlust führt, wenn die Arbeitspunktsverschiebung nach Gleichung 4.16 zu groß wird.

Wenn die Quadrupol-Stärken mit unzureichender Genauigkeit im Modell abgebildet werden, führt dies zu einer erheblichen Beeinträchtigung in der Genauigkeit der Berechnung sowohl des Orbits als auch der Betafunktionen und damit auch der Arbeitspunkte und Chromatizitäten. Da die Quadrupol-Stärken aufgrund der nicht vorhandenen Multipolmessungen für jeden einzelnen Magneten nur näherungsweise bekannt sind, liefern die Simulationen entsprechend große Abweichungen von den am Speicherring gemessenen Werten.

Nachfolgend werden die Ergebnisse von Simulationen, die auf gespeicherten Magnet-Setups basieren, mit den jeweiligen Messdaten verglichen. Dazu werden die Multipolstärken der Dipol-Korrektoren (einschließlich der Sextupol-Komponenten), Quadrupole und Sextupole aus den Stromwerten eines Magnet-Setups berechnet und im Modell berücksichtigt.

Zunächst wird gezeigt, dass die Berücksichtigung der aus der geodätischen Vermessung bekannten transversalen Positionsabweichungen der Magnete im Modell zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung führt, indem die Simulation zuerst ohne und dann mit den Positionskorrekturen durchgeführt wird und die Ergebnisse vergli-

\(^9\) Eine Ausnahme bildet Tabelle 7.1. Hier wurden zur besseren Vergleichbarkeit in beiden Software-Programmen die selben, dem MAD-Modell entnommenen, theoretischen Werte verwendet.
7. Modellierung des Speicherrings

... werden. Danach wird unter Berücksichtigung der Positionskorrekturen zusätzlich ein weitgehend linearisierter Orbit untersucht.

7.3.1. Berücksichtigung der transversalen Positionsabweichungen

Abbildung 7.5 zeigt die Abweichungen eines simulierten Orbits von einem gemessenen für die Delta-Standardoptik in beiden Ebenen, wenn die transversalen Positionsabweichungen im Modell nicht berücksichtigt werden. Die entsprechenden simulierten Betafunktionen, Orbitablagen und Dispersionen sind in Abbildung 7.6 dargestellt. Die Abweichungen belaufen sich an vielen Stellen des Orbits auf mehrere Zentimeter, was deutlich außerhalb der Akzeptanz sowohl der dynamischen Apertur als auch der Vakuumkammer liegt.


7.3.2. Annäherung im linearen Grenzfall

Da zu erwarten ist, dass die Abweichungen um so geringer werden, je weiter sich der Orbit dem Designorbit nähert und die Quadrupol- und Sextupol-Felder dadurch eine immer geringere Wirkung auf den Strahl haben, wurde der reale Orbit so weit wie möglich linearisiert. Zu diesem Zweck wurden ausgehend von der Delta-Standardoptik sowohl die Injektionsbeule als auch die Sextupole vollständig ausgeschaltet. Da der Sollorbit im Standardbetrieb vom Designorbit abweicht, wurde zugleich versucht den Orbit mit Hilfe der Orbitkorrektur möglichst nahe dem Designorbit zu nähern.

In Abbildung 7.9 ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen Simulation und Messung mit diesen Maßnahmen horizontal nochmals beinahe halbiert werden können. Damit liegen die horizontalen Abweichung zwar immer noch nicht in einem akzeptablen Bereich, jetzt dominieren jedoch die vertikalen Abweichungen, die durch diese Maßnahmen geringer beeinflusst wurden. Die entsprechenden simulierten Betafunktionen, Orbitablagen und Dispersionen sind in Abbildung 7.10 dargestellt, zum Vergleich der Arbeitspunkte und Chromatizitäten siehe Tabelle 7.7. Die Abweichungen im vertikalen Arbeitspunkt konnten auch durch die Linearisierung nicht beseitigt werden.
7.3. Ergebnisse der Simulation

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>AT (S) (Abb. 7.6)</th>
<th>AT-T (S) (Abb. 7.8)</th>
<th>M (L) (Abb. 7.10)</th>
<th>AT-T (L)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$Q_z$</td>
<td>3.2992</td>
<td>3.4373</td>
<td>3.3007</td>
<td>*</td>
</tr>
<tr>
<td>$\xi_\xi$</td>
<td>0.8</td>
<td>−10.5925</td>
<td>−15.5</td>
<td>−26.7770</td>
</tr>
<tr>
<td>$\xi_\zeta$</td>
<td>−0.5</td>
<td>−5.5195</td>
<td>−9.5</td>
<td>*</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**Tabelle 7.7:** Vergleich der mit der AT simulierten Strahlparameter ohne (AT) und mit (AT-T) Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen mit gemessenen Werten (M) für die Delta-Standardoptik (S) sowie für einen linearisierten Orbit (L) (jeweils 1.5 GeV, SAW eingeschaltet). Mit * markierte Werte ergaben in der Simulation keine reellen Ergebnisse.

Um die Abweichungen der simulierten von den gemessenen Orbits quantifizieren zu können, wurde jeweils die Standardabweichung

$$\bar{\sigma}_\xi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\xi_i - \bar{\xi})^2}$$

(7.4)

des Differenzorbits berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.8 zusammengefasst.

<table>
<thead>
<tr>
<th>AT - M (S) (Abb. 7.5)</th>
<th>AT-T - M (S) (Abb. 7.7)</th>
<th>AT-T - M (L) (Abb. 7.9)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$\sigma_\xi$</td>
<td>9.7982 mm</td>
<td>5.4230 mm</td>
</tr>
<tr>
<td>$\sigma_\zeta$</td>
<td>6.1774 mm</td>
<td>6.6028 mm</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**Tabelle 7.8:** Vergleich der Standardabweichungen $\sigma_\xi$ der Differenzen von simulierten (ohne (AT) und mit (AT-T) Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen) und gemessenen (M) Orbits für die Delta-Standardoptik (S) sowie für einen linearisierten Orbit (L) (jeweils 1.5 GeV, SAW eingeschaltet).

Es ist zu erwarten, dass eine weitergehende Linearisierung, beispielsweise durch Einstellen des Designorbits mit Hilfe der Dipol-Korrektoren, zu einer noch besseren Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Strahlparameter führt. Dies ist jedoch aufgrund der Magnetfehlaufstellungen derzeit nicht möglich, da die Anzahl und Stärke der Korrektoren nicht ausreichend ist, um die dadurch entstehenden Strahlstörungen zu kompensieren.
7. Modellierung des Speicherrings

Abbildung 7.5: Abweichung des simulierten von einem gemessenen Orbit für die Delta-Standardoptik (1.5 GeV, SAW eingeschaltet) in beiden Ebenen (simulierter Orbit ohne Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen, \( \zeta = \zeta_{\text{simuliert}} - \zeta_{\text{gemessen}} \)).

Abbildung 7.6: Mit der AT simulierte Strahlparameter ohne Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen für die Delta-Standardoptik (1.5 GeV, SAW eingeschaltet), basierend auf gemessenen Magnetströmen.
7.3. Ergebnisse der Simulation

Abbildung 7.7: Abweichung des simulierten von einem gemessenen Orbit der Delta-Standardoptik (1.5 GeV, SAW eingeschaltet) in beiden Ebenen (simulierter Orbit mit Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen, $\zeta = \zeta_{\text{simuliert}} - \zeta_{\text{gemessen}}$).

Abbildung 7.8: Mit der AT simulierte Strahlfparameter mit Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen für die Delta-Standardoptik (1.5 GeV, SAW eingeschaltet), basierend auf gemessenen Magnetströmen.
Abbildung 7.9: Abweichung des simulierten von einem gemessenen linearisierter Orbit (siehe Text, 1.5 GeV, SAW eingeschaltet, simulierter Orbit mit Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen, $\zeta = \zeta_{\text{simuliert}} - \zeta_{\text{gemessen}}$).

Abbildung 7.10: Mit der AT simulierte Strahlparameter mit Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen für einen linearisierter Orbit (1.5 GeV, SAW eingeschaltet), basierend auf gemessenen Magnetströmen.
7.3. Ergebnisse der Simulation

7.3.3. Einfluss der Sextupol-Komponenten der Dipol-Korrektoren

Zur Untersuchung des Einflusses der Sextupol-Komponenten der Dipol-Korrektoren wurden die Sextupol-Komponenten im Modell ausgeschaltet und anschließend die Tabelle 7.7 zugrunde liegenden Simulationen auf Basis der Magnet-Setups erneut durchgeführt. Dabei konnte jedoch in keinem Fall ein Gleichgewichtsorbit gefunden werden, unabhängig davon, ob die Dipol-Kicks der Korrektoren im Modell berücksichtigt wurden oder nicht.


<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>M</th>
<th>L</th>
<th>L, S</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$\xi_x$</td>
<td>0.8</td>
<td>0.5205</td>
<td>-1.9439</td>
</tr>
<tr>
<td>$\xi_z$</td>
<td>-0.5</td>
<td>-0.3486</td>
<td>0.9312</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Tabelle 7.9: Vergleich der gemessenen (M) Chromatizitäten mit den von der AT simulierten ohne (L) und mit (L, S) Berücksichtigung der Sextupol-Komponenten der Dipol-Korrektoren (Delta-Standardoptik, 1.5 GeV, SAW ausgeschaltet).

7. Modellierung des Speicherrings

7.3.4. Response-Vektoren

Um festzustellen, ob eine fehlerhafte Korrektorspule eine lokale Orbitstörung erzeugt und damit für die großen Abweichungen zwischen Simulation und Messung verantwortlich ist, wurden Response-Vektoren für jeden einzelnen Korrektor real gemessen. Dazu wurde der Erregungsstrom des jeweiligen Korrektors um $+0.1 \, \text{A}$ variiert, die resultierenden Response-Vektoren in beiden Ebenen gemessen und der der Stromvariation entsprechende Kickwinkel mit Hilfe der Software-Bibliothek $\text{i2k}$ aus dem Strom berechnet. Zum Vergleich wurde jeweils der Response-Vektor mit Hilfe des Kickwinkels im Modell simuliert. Dabei wurden für die restlichen Magnetstärken im Modell Designwerte angenommen.

Dabei ergaben sich bei den meisten Korrektoren zunächst nur geringe durchschnittliche Orbitabweichungen in der Größenordnung von etwa 0.1 bis 0.2 mm horizontal und von etwa 0.05 mm vertikal (siehe beispielsweise Abbildungen 7.11 und 7.12). Bei neun der 56 horizontalen und vertikalen Korrektoren war die simulierte Orbitdifferenz jedoch etwa um einen Faktor zwei bis drei größer als die gemessene. Bei späteren Kontrollmessungen bei leicht unterschiedlichen Arbeitspunkten und verschiedenen Optiken wurden diese Abweichungen nur teilweise reproduziert. Es wurde zwar zumeist ein Faktor zwei bis drei festgestellt, jedoch bei einer variierenden Anzahl (bis zu elf) von oftmals unterschiedlichen Korrektoren. Ein Fehler in der Ansteuerung der Korrektoren (siehe Kapitel 6.6) konnte nicht gefunden werden.


Die Ergebnisse der gemessenen und simulierten Response-Vektoren aller Korrektoren nach der Behebung dieser Fehlaufstellungen finden sich in [33]. Für einen horizontalen und einen vertikalen Korrektor sind diese Ergebnisse exemplarisch in Abbildungen 7.11 und 7.12 dargestellt.
7.3. Ergebnisse der Simulation

Abbildung 7.11: Vergleich der Response-Vektoren für hk01 [33].

Abbildung 7.12: Vergleich der Response-Vektoren für vk01 [33].
7. Modellierung des Speicherrings

7.3.5. Feld- und Positionsfehler

Im Rahmen der Modellierung konnte gezeigt werden, dass Fehler einzelner Magnete die Abweichungen der Strahlparameter zwischen Simulation und Messung nicht ausreichend erklären können. Im Folgenden wird gezeigt, dass zumindest die großen Abweichungen der Orbitablagen durch kumulative, über die Magnetstruktur verteilt Fehler erklärt werden können, die durch die Ungenauigkeiten in der Kenntnis der Multipolfelder sowie der Magnetpositionen gegeben sind.

Da die Dipol-Korrektoren nach den in Kapitel 5.2 zitierten Messungen Feldfehler von bis zu 8 % aufweisen können, was auch die Abweichungen der Response-Vektoren zwischen Simulation und Messung erklären könnte (Abbildungen 7.11 und 7.12), wurden die kumulierten Auswirkungen dieser Fehler im Folgenden untersucht. Dazu wurden die Korrektorstärken im Modell mit Hilfe normalverteilter Zufallszahlen jeweils zwischen $\pm 8$ % variiert. Dies wurde 10000 mal durchgeführt und jeweils der Orbit sowie die Arbeitspunkte und Chromatizitäten simuliert. Hierfür wurde wieder das der Tabelle 7.7, Spalte M (S) zugrunde liegenden Standard-Setup herangezogen. Die Einhüllenden aller simulierten Orbits sind in Abbildung 7.14 dargestellt. Die Bandbreiten der Arbeitspunkte und Chromatizitäten sind in Abbildung 7.15 zu erkennen.

Außerdem wurden mit Hilfe der selben Methode die Auswirkungen von Fehlern in der Positionsgenauigkeit der Quadrupole simuliert, da die im Modell berücksichtigten Magnetpositionen (siehe Anhang A.2) nicht während des Speicherbetriebes gemessen worden sind und sich somit aufgrund der Erwärmung der Vakuumkammer im Betrieb abweichende Magnetpositionen ergeben können (siehe Kapitel 6.3 und 8.1). Dazu wurde ein zufallsverteilter Positionsfehler von $\pm 300 \, \mu m$ angenommen und die Quadrupole im Modell jeweils in diesem Bereich verschoben. Die Einhüllenden der simulierten Orbits sind in Abbildung 7.16 dargestellt, die entsprechenden Bandbreiten der Arbeitspunkte und Chromatizitäten in Abbildung 7.17.

Die horizontalen Orbiteinhüllenden sowohl der Korrektorfeldfehler als auch der Quadrupol-Positionsfehler lassen genug Spielraum, um den realen Orbit (Abbildung 7.13) zu simulieren. Insbesondere bei der wahrscheinlich auftretenden Kombination beider Fehler ist die Abweichung zwischen Simulation und Messung somit durch kumulative Effekte erklärbar, die auf die unzureichende Kenntnis der einzelnen Magnetfelder und Magnetpositionen während des Betriebes zurückzuführen sind.
7.3. Ergebnisse der Simulation

Abbildung 7.13: *Gemessener Orbit für die Delta-Standardoptik (1.5 GeV, SAW eingeschaltet).*

Die vertikale Orbiteinhüllende der Korrektorfeldfehler ist dagegen nicht ausreichend breit, um den realen Orbit aufzunehmen. Mit Quadrupol-Positionsfehlern könnte dies nach Abbildung 7.16 möglich sein, jedoch sind diese Positionsungenaigkeiten unwahrscheinlich, da die Quadrupole vertikal kaum durch eine thermische Kammerbewegung verschoben werden können. Die Abweichungen des vertikalen Arbeitspunktes und der Chromatizitäten können mit beiden Fehlern nicht erklärt werden. Insbesondere die große Differenz zwischen Simulation und Messung des vertikalen Arbeitspunktes von etwa 0.2 konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden und sollte weiter untersucht werden.

Ein weiterer bekannter Fehler ist die unzureichende Kenntnis der genauen Feldstärke der DC-Korrektorspule dc3 [16]. Dies macht sich vor allem in der in Abbildung 7.8 erkennbaren fehlenden Abgeschlossenheit der Injektionsbeule bemerkbar (vor allem in den horizontalen Überschwingern zwischen $s = 40$ und 50 m). Durch Skalierung der Feldstärke dieser DC-Spule im Modell kann der Orbit horizontal recht gut an die Realität angenähert werden. Dadurch verbessert sich jedoch der vertikale Orbit nicht; der vertikale Arbeitspunkt entfernt sich sogar noch weiter vom gemessenen. Weitere Messungen und Simulationen zur Untersuchung dieses Problems stehen jedoch noch aus.

Eventuell ist eine Kalibrierung der Dipol-Korrektoren möglich, indem die simulierten Response-Vektoren einzeln durch Variation der jeweiligen Korrektorstärken an die gemessenen Response-Vektoren angepasst werden. Die zur Minimierung der Differenz notwendigen Abweichungen in den Korrektorfeldstärken könnten dann als Kalibrationsfaktoren dienen.
7. Modellierung des Speicherrings

Abbildung 7.14: Orbiteinhüllende für 10000 Simulationen mit zufallsverteilten Korrektorfeldfehlern.

Abbildung 7.15: Arbeitspunkte und Chromatizitäten für 10000 Simulationen mit zufallsverteilten Korrektorfeldfehlern.
7.3. Ergebnisse der Simulation

Abbildung 7.16: Orbiteinhüllende für 10000 Simulationen mit zufallsverteilten Quadrupol-Positionsfehlern.

8. Strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen

Innerhalb eines Tripletts sollten die Quadrupole möglichst auf einer Linie stehen, und der Teilchenstrahl sollte im Idealfall durch die Zentren der Quadrupole verlaufen. Ansonsten erzeugen die Quadrupole zusätzliche Ablenkungen, die eine Korrektur mit Dipol-Korrektormagneten erforderlich machen, um eine geschlossene Umlaufbahn zu gewährleisten. Aber auch zwischen zwei Tripletts sollte es möglichst keinen transversalen Versatz geben, da das Koordinatensystem in den Dipolen zwischen den Tripletts mit dem Strahl mit gedreht wird und sich somit alle Quadrupole für den Stahl auf einer geraden Linie befinden.

Aufgrund der in Kapitel 6.3 beschriebenen mechanischen Verschiebungen der Quadrupole durch die Bewegung der Vakuumkammer ergeben sich Versätze zwischen den einzelnen Magneten in Delta. Daher ist es erforderlich, die Positionen der Quadrupole relativ zueinander möglichst genau zu bestimmen, um sie an ihre Designpositionen zurück schieben und die Versätze beseitigen zu können.

Nach der prinzipiellen Vorstellung der Messmethode in Kapitel 8.2 wird zunächst im Rahmen der Fehlerbetrachtung in Kapitel 8.3 die Optimierung der absoluten Vorhersagen der Fehlaufstellungen diskutiert. Anschließend wird in Kapitel 8.4 eine Möglichkeit der iterativen Anwendung der Methode präsentiert, welche die Notwendigkeit für eine hohe Genauigkeit bei der Berechnung der absoluten Fehlaufstellungen relativiert.

8.1. Vorteile der strahlbasierten Messung


Ein erheblicher Vorteil der strahlbasierten Methode besteht darin, dass die Positionen der magnetischen Mitten der Quadrupole vermessen werden. Bei der geodätischen Vermessung werden dagegen die Messplatten auf den Eisenjochen als Referenz herangezogen. Nach den Ausführungen in Kapitel 6.5 ist die absolute Genauigkeit der geodätischen Vermessung bei DELTA damit auf etwa ± 100 bis 200 µm begrenzt. Außerdem ist unklar, inwieweit
die Zentren der magnetischen Felder mit den mechanischen Mittelpunkten der Eisenjoche übereinstimmen.

Ein weiterer Vorteil besteht in der Einfachheit der Methode. Dadurch ist es prinzipiell möglich, alle Tripletts nacheinander vom Kontrollraum aus zu vermessen, ohne jeweils das Messequipment (siehe Kapitel 6.5) vor Ort installieren zu müssen.


8.2. Messmethode

Die hier vorgestellte strahlbasierte Methode misst den Versatz ζ2 der magnetischen Mitte des zweiten (mittleren) Quadrupols eines Tripletts von der virtuellen Verbindungsachse der beiden äußeren Quadrupol-Zentren. Dabei werden beide Ebenen zugleich vermessen. Im Folgenden wird die Methode beispielhaft an der horizontalen x-Ebene erläutert, prinzipiell funktioniert sie in der vertikalen z-Ebene ebenso. Da die durch die Vakuumkammer bedingten mechanischen Verschiebungen sich hauptsächlich auf die horizontale Ebene auswirken, wird diese vorwiegend betrachtet. In dieser Ebene wirken die beiden äußeren Quadrupole in den Delta-Tripletts defokussierend, der mittlere fokussierend.

Zu Beginn jeder Messung muss der Orbit möglichst genau durch die magnetischen Mitten der beiden äußeren Quadrupole eines Tripletts geführt werden. Dies ist möglich, da diese Quadrupole in Delta nach Kapitel 5.1 jeweils mit BPMs ausgestattet sind. Der erste Schritt besteht folglich in der Kalibrierung dieser BPMs mittels BBC.

Während der BBC wurde bereits ein möglichst linearer Orbit eingestellt und die Korrektoren an den zu kalibrierenden BPMs wurden abgeschaltet. Für die weitere Messung muss auch ein eventuell auf dem mittleren Quadrupol montierter Korrektor abgeschaltet werden.

Ein Abschalten einzelner Sextupol-Familien führt zu einer Einschränkung der dynamischen Apertur; ein Abschalten aller Sextupole führt zu chromatizitätsbedingten Instabilitäten\(^1\). Daher ist beides in der Praxis nicht möglich, da dann selten mehr als wenige mA Strahlstrom gespeichert werden können, die zudem eine Lebensdauer von nur wenigen Minuten haben.

\(^1\)Als Beispiel sei hier die Head-Tail-Instabilität genannt, siehe dazu [73].
Abbildung 8.1 zeigt den prinzipiellen Strahlverlauf im Triplett.

**Abbildung 8.1:** Schematische Darstellung der strahlbasierten Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen. Der Elektronenstrahl zu Beginn der Messung mit der Stärke $k$ des mittleren Quadrupols ist als durchgezogene Linie (rot) eingezeichnet. Der Strahl während der Messung mit der Quadrupol-Stärke $k + \Delta k$ ist gepunktet (rot) eingezeichnet (nicht maßstabsgetreu, siehe Text).

Der Kickwinkel $\theta$, mit dem ein Teilchenstrahl mit der horizontalen Ablage $x_{cq}$ vom Zentrum des Quadrupol-Feldes $k$ abgelenkt wird, ergibt sich nach Gleichung 4.17 zu

$$\theta = x_{cq} \cdot k \cdot l_{\text{eff}}. \quad (8.1)$$

Die Stärke $k$ des mittleren Quadrupols im Triplett wird nun um einen definierten kleinen Wert $\Delta k$ geändert. Dies geschieht mit Hilfe der in Kapitel 4.4 beschriebenen Zusatzstromversorgung. Dadurch ändert sich der Kickwinkel $\theta$ des Quadrupols um $\Delta \theta$ und es stellt sich ein neuer Gleichgewichtsorbit ein. Der Orbit $x_{cq}$ am Ort des Quadrupols ändert sich damit um $\Delta x_{cq}$. Nach Gleichung 4.20 wird Gleichung 8.1 dann zu

$$\theta + \Delta \theta = (x_{cq} + \Delta x_{cq}) (k + \Delta k) \cdot l_{\text{eff}}. \quad (8.2)$$

Diese Gleichung lässt sich in eine Summe aus zwei Gleichungen für den Kickwinkel $\theta$ beziehungsweise die Änderung des Kickwinkels $\Delta \theta$ zerlegen:

$$\theta = (x_{cq} + \Delta x_{cq}) \cdot k \cdot l_{\text{eff}} \quad (8.3)$$

$$\Delta \theta = (x_{cq} + \Delta x_{cq}) \cdot \Delta k \cdot l_{\text{eff}} \quad (8.4)$$

Die resultierende Orbitabweichung $\tilde{x} = \tilde{x} - \tilde{x}_0$, also die Differenz zum ungestörten Orbit $\tilde{x}_0$, wird an allen BPMs aufgezeichnet.

Im Modell des Speicherrings wurde in den Zentren der Quadrupole jeweils ein virtueller Dipol-Korrektor platziert. Nun wird in einer Simulation ein Dipol-Kick mit der Stärke $\Delta \theta$
8. Strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen

am Ort des geänderten Quadrupols erzeugt. Durch Variation des Kickwinkels kann derjenige Winkel gefunden werden, der den Orbit $\vec{\Delta}x$ reproduziert. Dazu wird die Differenz $|\vec{\Delta}x - \vec{\Delta}x_{\text{sim}}|$ zwischen der gemessenen Orbitabweichung $\vec{\Delta}x$ und dem simulierten Orbit $\vec{\Delta}x_{\text{sim}}$ mit Hilfe eines numerischen Verfahrens minimiert (siehe Kapitel 8.3).

Neben dem Kickwinkel $\Delta \theta$ kann der Simulation nach Abschluss des Minimierungsverfahrens auch die Strahlablage $\Delta x_{\text{cq}}$ am Ort des Kicks entnommen werden. Mit diesen Werten kann mit Hilfe von Gleichung 8.4 die absolute Ablage $x_{\text{cq}}$ des ungestörten Orbits vom Zentrum des Quadrupols bestimmt werden:

$$x_{\text{cq}} = \frac{\Delta \theta}{k \cdot l_{\text{eff}}} - \Delta x_{\text{cq}}. \quad (8.5)$$

Durch Einsetzen von $x_{\text{cq}}$ in die ungestörte Gleichung 8.1 kann der absolute Kickwinkel $\theta$ berechnet werden, der durch das gesamte Quadrupol-Feld $k$ erzeugt wird. Aus dem Winkel $\theta$ lässt sich anschließend die Entfernung $x_{\text{ro}}$ des ungestörten Orbits vom Referenzorbit errechnen, der durch die Verbindungslinie der Zentren der äußeren Quadrupole gegeben ist. In Abbildung 8.2 sind die geometrischen Verhältnisse dargestellt: Der Winkel $\theta$ sowie die Strecken $s_1$ und $s_2$ zwischen den Quadrupol-Zentren sind bekannt, gesucht ist die Strahlablage $x_{\text{ro}}$.

Abbildung 8.2: Winkelverhältnisse zur Berechnung der Dreieckshöhe.

Die Strecke $x_{\text{ro}}$ lässt sich trigonometrisch mit den Teilwinkeln $\kappa_i$ darstellen:

$$\tan \kappa_1 = \frac{s_1}{x_{\text{ro}}} \Leftrightarrow \kappa_1 = \arctan \frac{s_1}{x_{\text{ro}}}, \quad (8.6)$$
$$\tan \kappa_2 = \frac{s_2}{x_{\text{ro}}} \Leftrightarrow \kappa_2 = \arctan \frac{s_2}{x_{\text{ro}}}. \quad (8.7)$$

Mit $\kappa_1 + \kappa_2 = \kappa$ gilt dann

$$\arctan \left( \frac{s_1}{x_{\text{ro}}} \right) + \arctan \left( \frac{s_2}{x_{\text{ro}}} \right) = \kappa. \quad (8.8)$$
Unter Anwendung eines Additionstheorems für den Tangens folgt weiter

\[
\arctan \frac{s_1 + s_2}{1 - \frac{s_1 s_2}{x_{ro}}} = \kappa
\]

\[\Leftrightarrow \frac{s_1 + s_2}{1 - \frac{s_1 s_2}{x_{ro}}} = \tan \kappa\]

\[\Leftrightarrow \frac{s_1 + s_2}{x_{ro}} = \left(1 - \frac{s_1 s_2}{x_{ro}}\right) \tan \kappa \quad (8.9)\]

\[\Leftrightarrow \frac{s_1 + s_2}{\tan \kappa x_{ro}} = x_{ro} - \frac{s_1 s_2}{x_{ro}}\]

\[\Leftrightarrow 0 = x_{ro}^2 - s_1 s_2\]

Diese quadratische Gleichung hat zwei Lösungen:

\[
x_{ro} = \frac{s_1 + s_2}{2 \tan \kappa} \pm \sqrt{\left(\frac{s_1 + s_2}{2 \tan \kappa}\right)^2 - s_1 s_2} \quad (8.10)
\]

Nach Abbildung 8.2 ist \(\kappa = \pi - \theta\). Wegen der Nullpunktsymmetrie und der \(\pi\)-Periodizität der Tangensfunktion ist daher

\[\tan \kappa = \tan (\pi - \theta) = -\tan \theta \quad (8.11)\]

und somit

\[
x_{ro} = -\frac{s_1 + s_2}{2 \tan \theta} \pm \sqrt{\left(\frac{s_1 + s_2}{2 \tan \theta}\right)^2 - s_1 s_2} \quad (8.12)
\]

Eine geometrisch korrekte Lösung ergibt sich dabei nur, wenn der zweite Term in Gleichung 8.12 das entgegengesetzte Vorzeichen des ersten Terms hat. Da das Vorzeichen des ersten Terms durch den Winkel \(\theta\) bestimmt wird, kann Gleichung 8.12 als

\[
x_{ro} = -\frac{s_1 + s_2}{2 \tan \theta} + \text{sgn} \theta \sqrt{\left(\frac{s_1 + s_2}{2 \tan \theta}\right)^2 - s_1 s_2} \quad (8.13)
\]

geschrieben werden.

Am Beispiel von Abbildung 8.1 soll nun noch die Vorzeichenkonvention von \(x_{ro}\) erläutert werden. Ein von links nach rechts in \(s\)-Richtung verlaufender Strahl wird am ersten Quadrupol nach oben beziehungsweise außen abgelenkt. Damit ist \(x_{ro}\) nach Kapitel 4.6 positiv. Am mittleren Quadrupol wird der Strahl dann mit einem negativen Kickwinkel \(\theta\) wieder nach unten beziehungsweise innen gelenkt. Ein negativer Kickwinkel \(\theta\) korrespondiert also zu einer positiven Ablage \(x_{ro}\). Damit ergibt sich \(x_{ro}\) schließlich zu

\[
x_{ro} = \frac{s_1 + s_2}{2 \tan \theta} - \text{sgn} \theta \sqrt{\left(\frac{s_1 + s_2}{2 \tan \theta}\right)^2 - s_1 s_2} \quad (8.14)
\]
Zuletzt kann die Entfernung $x_2$ des Zentrums des mittleren Quadrupols von der Verbindungs- linie der Zentren der beiden äußeren Quadrupole als Differenz von $x_{ro}$ und $x_{cq}$ berechnet werden:

$$x_2 = x_{ro} - x_{cq}. \quad (8.15)$$

In Übereinstimmung mit den Vorzeichenkonventionen in Kapitel 4.6 entspricht ein positiver Wert von $x_2$ einer Verschiebung des mittleren Quadrupols nach außen, ein negativer Wert bedeutet eine Verschiebung nach innen.

**Messung in beiden Ebenen**

Die Messung kann in beiden Ebenen zugleich erfolgen. In der vertikalen Ebene wirken die beiden äußeren Quadrupole in den Delta-Tripletts fokussierend, der mittlere Quadrupol wirkt defokussierend. Mögliche Strahlverläufe innerhalb eines Tripletts bei Verschiebung des mittleren Quadrupols sind in Abbildung 8.3 für die horizontale Ebene und in Abbildung 8.4 für die vertikale Ebene dargestellt.

**Abbildung 8.3:** Strahlverläufe im fokussierenden Quadrupol. Bei einer Verschiebung des Quadrupols von der s-Achse nach außen oder nach innen kann der Orbit jeweils außerhalb oder innerhalb des Quadrupol-Zentrums verlaufen.

Berechnung der Fehlaufstellungen der äußeren Quadrupole

Mit der beschriebenen Messmethode ist es nicht möglich zu entscheiden, ob der mittlere Quadrupol im Triplett relativ zu den beiden äußeren verschoben ist, oder ob einer der beiden äußeren relativ zu den beiden anderen verschoben ist. Hierzu müssen die Daten einer globalen geodätischen Vermessung hinzugezogen gezogen werden.

Wenn die Abweichung eines äußeren Quadrupols bestimmt werden soll, kann die Messung wie in Kapitel 8.2 beschrieben durchgeführt werden. Anschließend kann die Position des ersten Quadrupols relativ zur Verbindungslinie der beiden anderen mit Hilfe des Strahlensatzes nach Abbildung 8.5 berechnet werden:

\[ x_1 = -x_2 \frac{s_1 + s_2}{s_2}. \] (8.16)
8. Strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen

Abbildung 8.5: Berechnung der Fehlaufstellung des ersten Quadrupols im Triplett.

Das negative Vorzeichen resultiert daraus, dass eine Verschiebung des mittleren Quadrupols nach außen gleichbedeutend ist mit einer Verschiebung der anderen Quadrupole nach innen.

Genau so lässt sich auch die Position des dritten Quadrupols bestimmen:

\[ x_3 = -x_2 \frac{s_1 + s_2}{s_1}. \]  

(8.17)

8.3. Fehlerbetrachtung

Da der nach Gleichung 8.4 berechnete Kickwinkel \( \Delta \theta \) des Quadrupols sowohl über \( x_{cq} \) als auch über \( x_{ro} \) in die Berechnung der Fehlaufstellung \( x_2 \) nach Gleichung 8.15 eingeht, ist \( x_2 \) direkt von der Genauigkeit der Übereinstimmung des simulierten und des gemessenen Response-Vektors abhängig, der auf der einen Seite nach Variation der Quadrupol-Stärke mit Hilfe der BPMs im Speicherring gemessen wird und auf der anderen Seite mit Hilfe des virtuellen Korrektors im Zentrum des Quadrupols im Modell simuliert wird.

8.3.1. Fehlerquellen bei der Messung

Die Genauigkeit des gemessenen Response-Vektors ist zum einen abhängig von der Wahl der Stromstärke zur Erzeugung von \( \Delta k \). Die Stromstärke darf einerseits nicht zu groß gewählt werden, da damit die Gefahr eines Strahlverlustes durch einen zu großen Kickwinkel steigt und da nach Kapitel 5.1 die Messgenauigkeit der BPMs mit größeren Orbitablagen abnimmt. Andererseits darf die Stromstärke auch nicht zu klein gewählt werden, da die erzeugten Orbitänderungen ansonsten unterhalb der Messgenauigkeit der BPMs liegen.
In den durchgeführten Messungen führten Ströme über 1.5 A häufig zu Strahlverlusten, während Änderungen des $k$-Wertes mit Strömen unterhalb 0.1 A zumeist keine signifikant messbaren Orbitablagen oberhalb des Rauschens der BPM-Elektroniken erzeugten. Daher wurden alle Messreihen in 0.1-A-Schritten zwischen 0.1 und 1.5 A aufgenommen.

Zum anderen ist die Genauigkeit des gemessenen Response-Vektors von der Nullpunktkalibrierung der BPMs abhängig. Nach Kapitel 5.1 beträgt diese ± 20 bis 100 µm.

Mit Hilfe der Orbitkorrektur-Software, in der die Korrektoren im Triplet ausgeschaltet wurden, kann der Orbit so geführt werden, dass er in den kalibrierten BPMs den Designorbit schneidet. Aufgrund der longitudinalen Ausdehnung der Quadrupole und der Anordnung der BPMs außerhalb der Magnetjoche liegt der Strahl dann jedoch nicht genau in den Zentren der äußeren Quadrupole. Bei einer Jochlänge von 0.2 m für die kurzen Quadrupole und einem Designabstand von 0.017 m zwischen Außenkante des Quadrupols und Mitte der Pickup-Elektroden des BPMs ergibt sich ein Abstand von $\Delta s = 0.117$ m zwischen BPM und Quadrupol-Mitte. Ein typischer Kickwinkel $\theta$ im mittleren Quadrupol zwischen 0.5 und 2.5 mrad entspricht unter der näherungsweise richtigen Annahme äquidistanter Abstände im Triplet ($s_1 = s_2$) einem Winkel des Strahls zum Designorbit von $\theta/2 = 0.25$ bis 1.25 mrad in den äußeren Quadrupolen. Dies führt zu einer Ablage des Strahls von 29 bis 146 µm in den äußeren Quadrupolen und damit zu einer Verschiebung des gemessenen Versatzes $x_2$ um diesen Betrag. Dies liegt noch im Rahmen der Kalibrationsgenauigkeit der BPMs und wird daher im Folgenden vernachlässigt.

Zusätzlich sind statistische Schwankungen der Strahlage beobachtbar. Daher werden mehrere Messungen durchgeführt und die Ergebnisse arithmetisch gemittelt (siehe Kapitel 8.6).

**Einfluss der Korrektoren auf die Nullpunktkalibrierung**

Bei den bisherigen Kalibrationsmessungen trat häufig das Problem auf, dass keine saubere Parabel an die Messpunkte angepasst werden konnte [17]. Bei verschiedenen BPMs zeigten sich nicht eindeutige Parabeln wie in Abbildung 8.6, die bei mehreren Messungen an verschiedenen Tagen in ihrer Form nicht reproduzierbar waren.
8. Strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen


Als Ursache des Problems konnten im Rahmen dieser Arbeit die in Kapitel 5.2 beschriebenen Dipol-Korrektoren identifiziert werden. Wenn der Korrektor, der sich auf dem Joch des jeweils an der Messung beteiligten Quadrupols befindet, in der Orbitkorrektur-Software zur Verwendung ausgewählt ist, was standardmäßig für alle Korrektoren der Fall ist (siehe Kapitel 5.3), wird dieser auch für die Strahllageänderungen im Rahmen der BBC verwendet. Dadurch wird das dem Quadrupol-Feld überlagerte Dipol-Feld während der Messung ständig in seiner Stärke variiert, wodurch die errechneten Kalibrationswerte der betroffenen BPMs unbrauchbar werden. Nach Abwählen des jeweiligen Korrektors in der Orbitkorrektur ergeben sich eindeutige Parabeln.

Es wurde gezeigt, dass die so bestimmten Kalibrationswerte bis auf etwa 130 µm mit denen übereinstimmen, die bei einem vollständigen Ausschalten des Korrektors gemessen werden [49]. Es ist davon auszugehen, dass die Messung ohne die durch den Dipol-Korrektor überlagerten Multipolfelder das genauere Ergebnis liefert. Daher ist ein Ausschalten des Korrektors dem alleinigen Abwählen in der Orbitkorrektur vorzuziehen. Zum Ausschalten des Korrektors ist es jedoch erforderlich, den jeweiligen Setzwert von bis zu ±10 A langsam auf 0 A zu stellen, wobei die mit diesem Korrektor unterstützten Response-Beulen von der Orbitkorrektur-Software sukzessive auf die restlichen Korrektoren verteilt werden müssen, um einem ansonsten sehr wahrscheinlichen Strahlverlust vorzubeugen. Da diese Umverteilung aufgrund der begrenzten Zahl der Korrektoren in Delta nicht in allen Fällen möglich ist, können manche Korrektoren während des Standardbetriebes nicht komplett ausgeschaltet werden.
8.3.2. Fehlerquellen bei der Berechnung


8.3.2.1. Genauigkeit des Modells


Für die Stärken der Quadrupole und Sextupole werden in der Simulation Designwerte angenommen, da eine Berücksichtigung der realen Magnetströme aufgrund der in Kapitel 7.3 genannten Gründe nicht zwangsläufig zum Auffinden eines Gleichgewichtsorbit führt. Aus diesem Grund war auch kein quantitativer Vergleich zwischen simulierten Response-Vektoren mit Designmagnetstärken einerseits und auf Magnet-Setups basierten Magnetstärken andererseits möglich.


Es ist jedoch festzuhalten, dass die Korrekturen der größten Fehlaufstellungen im Rahmen der Messungen dieser Arbeit durchgeführt wurden (siehe Kapitel 8.6). Vor den Korrekturen waren Abweichungen um einen Faktor von bis zu zwei oder drei zwischen Simulation und Messung bei mehreren Response-Vektoren zu beobachten, die oft an verschiedenen Positionen verursacht wurden, die nicht immer reproduzierbar waren (siehe Kapitel 7.3). Daher ist anzunehmen, dass während einer Messung unter nicht bekannten Umständen eine solche Abweichung auftreten konnte. Dieser Abweichungsfaktor schlägt sich dann direkt in den berechneten Fehlaufstellungen der Quadrupole nieder.

8.3.2.2. Genauigkeit des Minimierungsalgorithmus


Der durch das Minimierungsverfahren bedingte Faktor schlägt sich genauso im berechneten Kickwinkel und damit auch in der berechneten Fehlaufstellung nieder. Daher wurde für die weiteren Messungen eine einfache Minimierung der Betragssumme der Differenzvektor-Hilfskomponenten vorgesehen, was zu einer erheblich besseren Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung bei kürzerer Rechenzeit führte.

Da eine Wiederholung der ersten Messungen, die mit dem unzulänglichen Minimierungsalgorithmus durchgeführt wurden, aufgrund der Randbedingungen des DELTA-Anlagenbetriebes nicht möglich war, konnte nur der letzte Teil der in Kapitel 8.6 präsentierten Messungen mit dem verbesserten Algorithmus durchgeführt werden. Aufgrund der im Folgenden beschriebenen iterativen Vorgehensweise konnten jedoch auch die ersten Messergebnisse sinnvoll verwendet werden.

8.4. Iterative Anwendung der Methode

Die Fehler, die durch Ungenauigkeiten im Modell und durch den numerischen Minimierungsalgorithmus verursacht werden, wirken sich nur auf die absolute Genauigkeit der berechneten Fehlaufstellungen aus. Die Richtung der Magnetverschiebung wird korrekt berechnet, eben-
so die Größenordnung der Fehlaufstellung, da die absolute Position nur durch die zuvor diskutierten Faktoren verfälscht wird.

Durch eine iterative Anwendung der Messmethode kann somit eine präzise Korrektur der Fehlaufstellung erfolgen, die nur noch von der Kalibrierungsgenauigkeit der BPMs abhängig ist. Dazu wird abwechselnd eine PositionsMESSung nach Kapitel 8.2 durchgeführt und der Magnet anschließend um die berechnete Strecke in die durch die Messung bestimmte Richtung verschoben. Da die simulierten Response-Vektoren bisher immer größer waren als die gemessenen und daher die Kickwinkel und damit auch die Fehlaufstellungen zu klein berechnet wurden, sollte der Magnet dabei nicht über die Designposition hinaus geschoben werden. Dieses Verfahren wird wiederholt, bis die berechnete Fehlaufstellung nur noch im Bereich der Kalibrierungsgenauigkeit der BPMs liegt.


8. Strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen

8.5. Probleme beim Verschieben der Quadrupol-Magnete


8.6. Ergebnisse der strahlbasierten Messung

8.6.1. qd01+04 (äußerer Quadrupol)

Für den zuerst vermessen und korrigierten Quadrupol qd01+04, dem ersten (äußeren) Quadrupol im mittleren Triplet des westlichen Bogens von Delta (Abbildung 8.8), werden die Messergebnisse nachfolgend exemplarisch ausgewertet. Nach Tabelle A.5 stand dieser Quadrupol im Mittel\(^2\) 1.05 mm zu weit innen. Tabelle 8.1 präsentiert die schrittweise Berechnung der Abweichung des ersten Quadrupols im Triplet von der Verbindungssachse der Zentren der beiden anderen Triplet-Quadrupole unter Anwendung der in Kapitel 8.2 hergeleiteten Gleichungen. Die für die Berechnung benötigten Parameter sind in Tabelle 8.2 zusammengefasst.

\(^2\)Die leichte Verdrehung des Quadrupols wurde nicht berücksichtigt, sondern das arithmetische Mittel von strahleingangs- und strahlausgangsseitiger Fehlaufstellung als Versatz des Quadrupol-Zentrums angenommen.
8.6. Ergebnisse der strahlbasierten Messung

<table>
<thead>
<tr>
<th>Δl / A</th>
<th>Δk / μrad</th>
<th>Δθ / mm</th>
<th>Δx_{cq} / mm</th>
<th>x_{cq} / mm</th>
<th>θ / mrad</th>
<th>x_0 / mm</th>
<th>x_2 / mm</th>
<th>x_1 / mm</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>0.1</td>
<td>-0.0077</td>
<td>2.7477</td>
<td>0.0389</td>
<td>-0.8579</td>
<td>0.6944</td>
<td>-0.6090</td>
<td>0.2489</td>
<td>-0.4437</td>
</tr>
<tr>
<td>0.2</td>
<td>-0.0154</td>
<td>5.1113</td>
<td>0.0723</td>
<td>-0.8354</td>
<td>0.6762</td>
<td>-0.5931</td>
<td>0.2423</td>
<td>-0.4321</td>
</tr>
<tr>
<td>0.3</td>
<td>-0.0231</td>
<td>7.1540</td>
<td>0.1013</td>
<td>-0.8138</td>
<td>0.6587</td>
<td>-0.5777</td>
<td>0.2361</td>
<td>-0.4209</td>
</tr>
<tr>
<td>0.4</td>
<td>-0.0308</td>
<td>9.3271</td>
<td>0.1320</td>
<td>-0.8289</td>
<td>0.6709</td>
<td>-0.5885</td>
<td>0.2404</td>
<td>-0.4287</td>
</tr>
<tr>
<td>0.5</td>
<td>-0.0385</td>
<td>11.0343</td>
<td>0.1562</td>
<td>-0.8159</td>
<td>0.6604</td>
<td>-0.5792</td>
<td>0.2367</td>
<td>-0.4220</td>
</tr>
<tr>
<td>0.6</td>
<td>-0.0464</td>
<td>12.2052</td>
<td>0.1727</td>
<td>-0.7794</td>
<td>0.6308</td>
<td>-0.5533</td>
<td>0.2261</td>
<td>-0.4031</td>
</tr>
<tr>
<td>0.7</td>
<td>-0.0539</td>
<td>13.7265</td>
<td>0.1943</td>
<td>-0.7806</td>
<td>0.6318</td>
<td>-0.5542</td>
<td>0.2264</td>
<td>-0.4037</td>
</tr>
<tr>
<td>0.8</td>
<td>-0.0616</td>
<td>17.0190</td>
<td>0.2409</td>
<td>-0.8770</td>
<td>0.7099</td>
<td>-0.6226</td>
<td>0.2544</td>
<td>-0.4536</td>
</tr>
<tr>
<td>0.9</td>
<td>-0.0693</td>
<td>18.4568</td>
<td>0.2612</td>
<td>-0.8744</td>
<td>0.7078</td>
<td>-0.6208</td>
<td>0.2537</td>
<td>-0.4523</td>
</tr>
<tr>
<td>1.0</td>
<td>-0.0771</td>
<td>20.7598</td>
<td>0.2938</td>
<td>-0.9146</td>
<td>0.7403</td>
<td>-0.6493</td>
<td>0.2653</td>
<td>-0.4730</td>
</tr>
<tr>
<td>1.1</td>
<td>-0.0848</td>
<td>21.0155</td>
<td>0.2974</td>
<td>-0.8686</td>
<td>0.7031</td>
<td>-0.6167</td>
<td>0.2520</td>
<td>-0.4493</td>
</tr>
<tr>
<td>1.2</td>
<td>-0.0925</td>
<td>22.8524</td>
<td>0.3234</td>
<td>-0.8927</td>
<td>0.7226</td>
<td>-0.6338</td>
<td>0.2590</td>
<td>-0.4617</td>
</tr>
<tr>
<td>1.3</td>
<td>-0.1002</td>
<td>23.5205</td>
<td>0.3329</td>
<td>-0.8740</td>
<td>0.7074</td>
<td>-0.6205</td>
<td>0.2535</td>
<td>-0.4520</td>
</tr>
<tr>
<td>1.4</td>
<td>-0.1080</td>
<td>26.3468</td>
<td>0.3729</td>
<td>-0.9351</td>
<td>0.7569</td>
<td>-0.6639</td>
<td>0.2713</td>
<td>-0.4837</td>
</tr>
<tr>
<td>1.5</td>
<td>-0.1157</td>
<td>27.4245</td>
<td>0.3882</td>
<td>-0.9345</td>
<td>0.7564</td>
<td>-0.6634</td>
<td>0.2711</td>
<td>-0.4833</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Tabelle 8.1: Messdaten und Berechnung der Fehlaufstellung des Quadrupols qd01+04 vor der Korrektur.

\[
\begin{align*}
I_{\text{eff}} &= 0.434 \text{ m} \\
\kappa &= -1.865 \\
\Theta_1 &= 1.5638 \text{ m} \\
\Theta_2 &= 1.9973 \text{ m}
\end{align*}
\]

Tabelle 8.2: Parameter für die Berechnung der Fehlaufstellung des Quadrupols qd01+04.

Als arithmetisches Mittel der Daten aus Tabelle 8.1 ergibt sich für \( x_2 \) nach Gleichung 8.15 (0.249 ± 0.012) mm und für \( x_1 \) nach Gleichung 8.16 (−0.444 ± 0.021) mm. Unter der Voraussetzung, dass der mittlere Quadrupol horizontal auf Designposition steht, was nach Tabelle A.5 gegeben ist, ist der Quadrupol qd01+04 also im Mittel um 0.44 mm nach innen verschoben.

Der Quadrupol qd01+04 wurde anschließend parallel um 1 mm in zwei Schritten zu je 0.5 mm nach außen geschoben. Die Strecke wurde dabei mit einer mechanischen Messuhr überwacht. Nach jedem Schritt wurde sowohl eine strahlbasierte Messung als auch eine geodätische Vermessung durchgeführt. Die geodätische Vermessung ergab eine Verschiebung des Quadrupol-Zentrums von 0.66 mm nach dem ersten Schritt und 1.03 mm nach dem zweiten\(^3\) [4].

\(^3\)Der Quadrupol wurde dabei strahleingangsseitig um 0.94 mm und strahlaustragsseitig um 1.12 mm nach außen bewegt.
Nach dem ersten Verschieben ergab sich als arithmetisches Mittel der strahlbasierten Messung eine Abweichung des qd01+04 von $(-0.258 \pm 0.007)$ mm von der Designposition und damit ein Verschiebung von 0.186 mm nach außen. Nach dem zweiten Verschieben ergab sich eine Abweichung von $(-0.039 \pm 0.009)$ mm und damit eine Gesamtverschiebung von 0.406 mm. Anhand dieser Daten lässt sich erkennen, dass die strahlbasierten Messungen jeweils einen um einen Faktor 2 bis 4 kleineren Wert ergeben als die real bewegte Strecke. Es ist jedoch auch erkennbar, dass die Richtung der Verschiebung korrekt ist und am Ende nur noch eine marginale Abweichung von der Designposition messbar ist.

8.6.2. qd04+06 (äußerer) und qf03+03 (mittlerer Quadrupol)

Nach dem selben Verfahren wurden die Positionen der Quadrupole qf03+03 und qd04+06 vermessen. Der Quadrupol qf03+03 ist dabei der zweite (mittlere) Quadrupol des Tripletts und der qd04+06 der dritte (äußere) (Abbildung 8.8). Wie Tabelle A.5 zu entnehmen ist, stand der qf03+03 1.5 mm zu weit außen. Der qd04+06 war dagegen verdreht; strahleingangsseitig betrug die Abweichung von der Designposition 2.1 mm nach außen und strahlaustragenderseitig 0.8 mm in die gleiche Richtung.

Daher wurde zunächst der qd04+06 mit Hilfe der Messuhr an einem Querlenker strahleingangsseitig in zwei Schritten um insgesamt 1.5 mm nach innen geschoben. Laut geodätischer Vermessung ist er dabei strahleingangsseitig um 1.49 mm und strahlaustragenderseitig um 0.25 mm nach innen bewegt worden. Da dieser Quadrupol mit einem BPM ausgestattet ist (bpm17), kann zusätzlich die Differenz der BPM-Offsets zwischen einer BBC vor und einer nach der Korrektur berechnet werden. Danach hat sich der BPM in Relation zum Quadrupol-Zentrum durch die Verschiebung um $-1.342$ mm verändert, was gut mit den Messdaten übereinstimmt. Anschließend wurde der qf03+03 parallel um 0.5 mm nach innen geschoben. Die geodätische Vermessung ergab hierbei eine mittlere Bewegung von 0.36 mm.

Die strahlbasierte Messung ergab vor der Korrektur der beiden Quadrupole eine Abweichung des qf03+03 von $(0.542 \pm 0.029)$ mm von der Achse der beiden äußeren Tripletts-Quadrupole. Nach der Drehung des qd04+06 und der Verschiebung des qf03+03 ergab sich für letzteren eine Abweichung von $(0.675 \pm 0.023)$ mm. Es wurde keine Messung zwischen den beiden Korrekturen vorgenommen. Die augenscheinliche Verschlechterung der Abweichung des mittleren Quadrupols von der Tripletts-Achse ist durch die vorherige Drehung des dritten Quadrupols zu erklären. Dadurch wurde die der Tripletts-Mitte zugewandte Seite des dritten Quadrupols nach innen verschoben, was wiederum zu einer Verschiebung der Achse zwischen den Zentren der äußeren Quadrupole nach innen führte. Damit vergrößerte sich der Abstand des mittleren Quadrupols von der Tripletts-Achse. Durch die anschließende Verschiebung des mittleren Quadrupols nach innen wurde dieser Abstand dann zwar wieder verkleinert, am Ende ist er jedoch größer als zu Beginn der beiden Korrekturen.
Es erwies sich mit jedem durchgeführten Korrekturschritt als immer schwieriger, die Magnet- einstellungen des Speicherrings wieder so anzupassen, dass ein stabiler Injektions- und Speicherbetrieb möglich war. Daher wurde zunächst davon abgesehen, den Quadrupol qf03+03 noch weiter in Richtung Designposition zu verschieben.

8.6.3. qd04+11 (äußerer Quadrupol)

Die letzte Korrektur wurde bei dem Quadrupol qd04+11 vorgenommen, dem ersten (äußeren) innerhalb seines Triplets (Abbildung 8.8). Dieser Quadrupol war ebenfalls stark verdreht; strahleingangsseitig betrug die Abweichung von der Designposition \(-4.4\) mm und strahlaustrittsseitig \(-0.7\) mm. Im Rahmen der Korrektur wurde der Quadrupol mit Hilfe der Messuhr strahleingangsseitig um 3 mm nach außen geschoben. Dies resultierte in einer Änderung der BPM-Offsets des bpm34 um \(-2.053\) mm, die mit Hilfe von BBCs vor und nach der Verschiebung bestimmt wurde. Während der Verschiebung des Quadrupols war ein hoher Widerstand der Vakuumkammer zu überwinden, da diese an den Polschuhen des Quadrupols anlag und in den angrenzenden Quadrupolen verkantet war.

Rein rechnerisch beträgt die Abweichung \(x_2\) nach Tabelle A.5 im Mittel\(^4\) \(0.775\) mm. Für die bisherigen Messungen wurde ausschließlich der Minimierungsalgorithmus für multivariate Funktionen verwendet, da eine Wiederholung der Messungen nach den Ausführungen in Kapitel 8.3 nicht möglich war. Für diese Messung wurde zusätzlich die Minimierung der Betragssumme angewandt. Mit dem ersten Algorithmus ergibt sich vor der Korrektur eine Abweichung von \((0.479 \pm 0.004)\) mm für den mittleren Quadrupol, mit dem zweiten Algorithmus ergibt sich dagegen \((0.724 \pm 0.007)\) mm. Der zweite Wert kommt der realen Fehlaufstellung deutlich näher. Der Unterschied beträgt nur noch \(50\) µm und liegt schon im Bereich der Kalibrationsgenauigkeit der BPMs von \(20\) bis \(100\) µm. Daher wurde für die weiteren Messungen nur noch der zweite Algorithmus verwendet.

Nach der Drehung des qd04+11 ergab die strahlbasierte Messung eine Abweichung von \((0.416 \pm 0.008)\) mm. Dies stellt schon eine deutliche Verbesserung dar, eine weitere Korrektur dieses Quadrupols sowie auch des qd04+12, des dritten Quadrupols im Triplet, der ebenfalls stark verdreht ist, wäre wünschenswert. Aufgrund der Verkantung der Vakuumkammer ist dies jedoch ohne mechanische Arbeiten zum Freilegen der Quadrupole nicht möglich.

Die geodätische Vermessung zeigte deutlich, dass durch die Verkantung der Vakuumkammer mehrere Quadrupole mit bewegt wurden: Der qd04+11 wurde wie gewünscht strahleingangs-

seitig um 2.92 mm bewegt. Gleichzeitig wurde er strahlausgangsseitig um –0.44 mm bewegt. Zusätzlich wurde der folgende Quadrupol qf03+06 unerwünscht um 0.33 mm strahleingangsseitig und 0.46 mm strahlausgangsseitig bewegt. Der nächste Quadrupol qd04+12 wurde ebenfalls unerwünscht strahleingangsseitig um 0.41 mm verschoben. Auch im nächsten Triplette wurde der mittlere Quadrupol qs02+01 um 0.49 mm nach außen geschoben.

Insgesamt ergibt sich somit rechnerisch nach der Verschiebung eine geodätische Abweichung von 0.448 mm. Das Ergebnis der strahlbasierten Messung stimmt damit bis auf etwa 30 µm überein.

Die Positionen aller verschobenen Quadrupole sind in Abbildung 8.8 markiert.

Abbildung 8.8: Positionen der verschobenen Quadrupole im Speicherring Delta: Kapitel 8.6.1 (gelb), Kapitel 8.6.2 (blau) und Kapitel 8.6.3 (grün).

8.6.4. Entlastung der Korrektoren

für jede Ebene $\zeta$ als Betragssumme aller $n$ Kickwinkel in dieser Ebene:

$$\theta_{\zeta}^{\text{int}} = \sum_{j=1}^{n} |\theta_{\zeta,j}|.$$  \hspace{1cm} (8.18)


<table>
<thead>
<tr>
<th>Korrektur an Quadrupol</th>
<th>$\theta_{\zeta}^{\text{int}}$ / mrad</th>
<th>$\theta_{\zeta}^{\text{int}}$ / mrad</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>vor qd01+04</td>
<td>25.00</td>
<td>7.87</td>
</tr>
<tr>
<td>nach qd01+04</td>
<td>32.51</td>
<td>9.02</td>
</tr>
<tr>
<td>vor qd04+06</td>
<td>26.79</td>
<td>9.70</td>
</tr>
<tr>
<td>nach qd04+06</td>
<td>26.57</td>
<td>9.80</td>
</tr>
<tr>
<td>vor qf03+03</td>
<td>26.57</td>
<td>9.80</td>
</tr>
<tr>
<td>nach qf03+03</td>
<td>25.77</td>
<td>8.77</td>
</tr>
<tr>
<td>vor qd04+11</td>
<td>22.28</td>
<td>8.10</td>
</tr>
<tr>
<td>nach qd04+11</td>
<td>23.28</td>
<td>10.54</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Tabelle 8.3: Integrale Korrektorstärken vor und nach den Korrekturen der Quadrupol-Fehlaufstellungen, jeweils bei Nutzerbetriebsorbit gemessen.

Vor den Korrekturen erreichte jedoch meistens mindestens ein Dipol-Korrektor das positive oder negative Limit des von den Netzgeräten unterstützten Strombereiches von $\pm 10$ A, da die maximale Stärke für die von der Orbitkorrektur berechnete Lösung zur Erreichung des Sollorbits nicht ausreichend war [17]. Nach den Korrekturen wurde zumindest bei den horizontalen Dipol-Korrektoren die Last gleichmäßig verteilt. Während vorher Spulenströme zwischen $\pm 9$ und 10 A normal waren, liegen jetzt alle Korrektorströme unter $\pm 8.5$ A.

Nach der Korrektur aller transversalen Fehlaufstellungen im Speicherring ist eine Minimierung der integralen Korrektorstärke für den Designorbit zu erwarten; im Idealfall entfällt die
8. Strahlbasierte Messung von Quadrupol-Fehlaufstellungen

9. Messung der BPM-Positionen

Wenn die Quadrupole von den Bewegungen der Vakuumkammer entkoppelt werden, dann können sich die variablen BPMs nach den Ausführungen in Kapitel 6.3 transversal in beiden Ebenen um bis zu $\pm 1.8 \text{ mm}$ relativ zum Quadrupol-Zentrum bewegen, sofern nicht andere Elemente die Bewegungsfreiheit einschränken. Die internen Sextupol-Polspulen (Abbildung 4.17) erlauben an manchen Stellen keine vertikale Bewegung, da sie an den Polen anliegen. Die betroffenen Polspulen müssen daher überarbeitet oder gegen neu designierte Spulen ausgetauscht werden. In den externen Sextupolen ist die Bewegung der Vakuumkammer ebenfalls teilweise bis auf deutlich weniger als $\pm 1 \text{ mm}$ eingeschränkt. Die Gründe hierfür müssen noch weiter untersucht werden [59].

Eventuell kann es im Rahmen der zur Entkopplung notwendigen Maßnahmen zusätzlich erforderlich sein, die BPM-Wülste an einigen weiteren fixierten BPMs abzufräsen, um mehr Spielraum für notwendige Kammerbewegungen zu schaffen, als im ursprünglichen Design vorgesehen war. Auf jeden Fall können sich die mittels BBC (siehe Kapitel 5.1) bestimmten Offsets einiger BPMs im laufenden Betrieb verändern, wenn sich die Vakuumkammer durch Synchrotronstrahlung erwärmt und ausdehnt und dabei die Monitorköpfe mit bewegt und relativ zu den Quadrupol-Mitten verschiebt.

9.1. System zur dynamischen Änderung der BPM-Offsets

Da dieser Effekt nicht verhindert werden kann, sollen die Positionsänderungen der Monitorköpfe relativ zu den Quadrupol-Jochen gemessen und die Offsets automatisch angepasst werden. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Arbeit ein entsprechendes Konzept [58] weiterentwickelt und implementiert.

9.1.1. Halterungen

Für die in Kapitel 6.4 beschriebenen Wegenaufnehmer wurden Halterungen gefertigt, um die Wegenaufnehmer horizontal und vertikal an den Quadrupolen montieren zu können (Abbildung 9.1).
9.1. System zur dynamischen Änderung der BPM-Offsets


9.1.2. Elektronik


9.2. Genauigkeit des Wegaufnehmersystems

Schwingungs- und Temperaturstabilität

Die Quadrupole schwingen mit einer Frequenz von etwa 5 Hz und einer maximalen Amplitude von 0.3 µm [68]. Aufgrund der in Kapitel 6.4 aufgeführten technischen Daten liegt diese Frequenz zwar im messbaren Bereich, die Amplitude ist jedoch nicht auflösbar.

Die Temperatur innerhalb der DELTA-Halle bleibt aufgrund der Raumluftkühlanlage relativ konstant. Ausgehend von einer maximalen Temperaturdrift von 10 K innerhalb einer Betriebswoche liegt die daraus resultierende Ungenauigkeit der Wegaufnehmer nach Kapitel
6.4 bei weniger als 4 µm. Für die BPM-Kalibration ist dies ausreichend, da die Genauigkeit der BBC nach Kapitel 5.1 nicht besser als 20 bis 100 µm ist. Das Auflösungsvermögen der Bergoz-Elektroniken beträgt etwa ± 5 µm, so dass dieser Fehler der Wegaufnehmer mit den aktuell für die Orbitkorrektur hauptsächlich verwendeten BPM-Elektroniken nicht auflösbar und somit für die Stabilität der Strahlage vernachlässigbar ist. Sollten in Zukunft hauptsächlich Libera-Elektroniken mit einer Auflösung von ± 1 µm eingesetzt werden, so ist dieses Problem weiter zu untersuchen.

**Einfluss des Quadrupol-Magnetfeldes**

Da die induktiv arbeitenden Wegaufnehmer sich innerhalb des Randfeldes der Quadrupole befinden, ist eine Beeinträchtigung der Messgenauigkeit in Abhängigkeit vom Quadrupol-Feld zu erwarten. Daher wurde der Einfluss des Magnetfeldes auf die Wegaufnehmer untersucht [31]. Danach ist die ausgegebene Spannung der Wegaufnehmer nichtlinear von der Stärke des Quadrupol-Feldes abhängig.

Bei einem horizontal montierten Wegaufnehmer führt eine Erhöhung des Quadrupol-Erregungsstromes von 0 auf 60 A zu einer Erhöhung ΔU der Ausgangsspannung um bis zu 1.9 % bei einer Position der Messstange des Wegaufnehmers von etwa 2 mm, was einer Positionsungenauigkeit von etwa ± 40 µm entspricht [31] (Abbildung 9.4).

![Abbildung 9.4: Abhängigkeit der Ausgangsspannung eines induktiven Wegaufnehmers vom Erregungsstrom der Quadrupol-Spulen: Horizontale Montage, Position der Messstange etwa 2 mm [31].](image)

ΔU ist aber auch von der Position des Messkopfes und damit der Eindringtiefe der Messstange in das Wegaufnehmergehäuse abhängig. Durch die Abschirmung des Gehäuses beträgt ΔU bei einer Position der Messstange von etwa 4 mm nur noch 0.7 % (Abbildung 9.5). Alle Werte sind über mehrere Messungen hinweg reproduzierbar.
9. Messung der BPM-Positionen

Abbildung 9.5: Abhängigkeit der Ausgangsspannung eines induktiven Wegaufliebers vom Erregungsstrom der Quadrupol-Spulen: Horizontale Montage, Position der Messstange etwa 4 mm [31].

Da die Wegaufliebers vertikal aufgrund der baulichen Bedingungen trotz Verlängerung der Messstange weiter in das Quadrupol-Feld hinein ragen müssen, ist hier ein entsprechend größerer Fehler zu beobachten. Bei Positionen der Messstange von 3 und 1 mm ergeben sich über den gesamten Strombereich des Quadrupols von \( \Delta I = 60 \text{ A} \) Abweichungen \( \Delta U \) von 6 und 44 \% (Abbildung 9.6). Im Extremfall entspricht dies einer Positions ungenaugkeits von bis zu \( \pm 300 \mu\text{m} \) [31].

Abbildung 9.6: Abhängigkeit der Ausgangsspannung eines induktiven Wegaufliebers vom Erregungsstrom der Quadrupol-Spulen: Vertikale Montage, Position der Messstange etwa 1 mm [31].

Innerhalb einer Strahloptik würde eine Änderung der Stärke eines Quadrupols um mehrere Ampère vom Startwert in der Realität meistens zu einem Strahlverlust führen. Realistisch sind bei einigen Quadrupolen während strahlbasierter Messungen Änderungen um \( \Delta I = \pm 3 \text{ A} \) möglich, während des normalen Speicherbetriebes jedoch erheblich weniger. Die Variationen der Quadrupol-Stärken zur Anpassung des Arbeitspunktes liegen im Bereich von \( \pm 0.1 \) bis 1 \%, was Strömen von etwa \( \pm 0.01 \) bis 0.6 A entspricht.
9.2. Genauigkeit des Wegaufnehmersystems

Bei den vertikal montierten Wegaufnehmern ergibt sich damit für $\Delta I = \pm 3$ A abhängig vom Basisstrom $I$ des Quadrupols eine Abweichung von maximal $\pm 15 \, \mu\text{m}$ und für $\Delta I = \pm 0.6$ A während des Standardbetriebes von maximal $\pm 3 \, \mu\text{m}$. Analog zu den Ausführungen zur Temperaturstabilität ist dies für BPM-Kalibration im Rahmen der BBC ausreichend. Auch die Stabilität der Strahlage während des normalen Speicherbetriebes ist bei Verwendung der Bergoz-Elektroniken sichergestellt. Für die Verwendung der genaueren Libera-Elektroniken sind jedoch auch hier weitere Untersuchungen erforderlich.

Für die horizontal montierten Wegaufnehmer ergibt sich im Standardbetrieb sogar nur eine Abweichung in der Größenordnung von $\pm 0.4 \, \mu\text{m}$. In dieser Ebene, in der sich auch hauptsächlich die durch die thermische Kammerbewegung verursachten Quadrupol-Verschiebungen bemerkbar machen, sind die Fehler der Wegaufnehmer daher in jedem Fall zu vernachlässigen.

Beim Übergang von einer Strahloptik zu einer anderen können die Startwerte der Quadrupole in beiden Optiken eine größere Stromdifferenz zueinander aufweisen. Dies ist dann durch eine Korrektur der absoluten BPM-Offsets zu berücksichtigen. Im normalen Betrieb wird jedoch stets dieselbe Standardoptik verwendet.
10. Zusammenfassung und Ausblick


Die simulierten absoluten Strahlparameter weichen noch zu stark von den real gemessenen ab; insbesondere sind die Strahlablagen des Gleichgewichtsorbits in der Simulation um eine Größenordnung zu groß. Simulationen von verteilten Dipol-Feldfehlern und Quadrupol-Positionsfehlern deuten darauf hin, dass diese Abweichungen auf die unzureichende Kenntnis der realen Dipol-Feldstärken und der aktuellen Quadrupol-Positionen zurückgeführt werden können.

Bei allen Vergleichen von Simulationen mit Messdaten ist der vertikale Arbeitspunkt um etwa 0.2 und damit deutlich zu groß. Die Ursache dafür konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden.


Ein System zur automatischen Messung der BPM-Positionen mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern wurde im Rahmen dieser Arbeit getestet. Das System ist dafür vorbereitet, eine dynamische Offset-Korrektur aller BPMs durchzuführen, die von der Orbitkorrektur ausgewertet werden kann.

Wenn alle Quadrupole ideal ausgerichtet sind, so dass es innerhalb der Tripletts keine Abweichungen mehr gibt, ist eine Erweiterung der strahlbasierten Messmethode denkbar, um die Tripletts über die Dipole hinweg relativ zueinander auszurichten.

A. Anhang

A.1. Magnetstruktur des Speicherrings Delta

Die Tabellen auf den folgenden Seiten geben die Designmagnetstruktur des Speicherrings Delta wieder.
### Tabelle A.1: Magnetstruktur des 1. Quadranten des Speicherrings Delta.

<table>
<thead>
<tr>
<th>s / m</th>
<th>Element</th>
<th>$l_{\text{eff}}$ / m</th>
<th>s / m</th>
<th>Element</th>
<th>$l_{\text{eff}}$ / m</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>0.217</td>
<td>bpm01</td>
<td>0.234</td>
<td>11.955</td>
<td>sf3+03</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>1.780</td>
<td>qd01+01</td>
<td>0.234</td>
<td>12.380</td>
<td>qd04+04</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>1.780</td>
<td>vk01</td>
<td>0.234</td>
<td>12.497</td>
<td>bpm08</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>1.897</td>
<td>bpm02</td>
<td>0.084</td>
<td>12.585</td>
<td>sd1+07</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>1.985</td>
<td>sd1+01</td>
<td>1.145</td>
<td>13.325</td>
<td>b+04</td>
<td>1.145</td>
</tr>
<tr>
<td>2.725</td>
<td>b+01</td>
<td>0.084</td>
<td>14.065</td>
<td>sd2+01</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>3.465</td>
<td>sd1+02</td>
<td>0.084</td>
<td>14.153</td>
<td>bpm09</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>3.553</td>
<td>bpm03</td>
<td>0.234</td>
<td>14.270</td>
<td>qn01+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>3.670</td>
<td>qd02+01</td>
<td>0.234</td>
<td>14.270</td>
<td>vk05</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>3.670</td>
<td>vk02</td>
<td>0.234</td>
<td>14.270</td>
<td>sn1+01</td>
<td>0.165</td>
</tr>
<tr>
<td>4.950</td>
<td>qf02+01</td>
<td>0.434</td>
<td>14.850</td>
<td>qn02+01</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>4.950</td>
<td>hk02</td>
<td>0.434</td>
<td>14.850</td>
<td>hk05</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>4.950</td>
<td>sf2+01</td>
<td>0.434</td>
<td>14.850</td>
<td>sf2+04</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>5.255</td>
<td>sf3+01</td>
<td>0.084</td>
<td>15.155</td>
<td>sf3+04</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>5.680</td>
<td>qd03+01</td>
<td>0.234</td>
<td>15.733</td>
<td>bpm10</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>5.680</td>
<td>vk03</td>
<td>0.234</td>
<td>15.850</td>
<td>qn03+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>5.797</td>
<td>bpm04</td>
<td>0.084</td>
<td>16.055</td>
<td>sd2+02</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>5.885</td>
<td>sd1+03</td>
<td>0.084</td>
<td>17.138</td>
<td>b7+01</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>6.625</td>
<td>b+02</td>
<td>1.145</td>
<td>17.708</td>
<td>bpm11</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>7.365</td>
<td>sd1+04</td>
<td>0.084</td>
<td>17.825</td>
<td>qn04+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>7.453</td>
<td>bpm05</td>
<td>0.084</td>
<td>17.825</td>
<td>hk06</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>7.570</td>
<td>qd04+01</td>
<td>0.234</td>
<td>19.608</td>
<td>bpm12</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>8.300</td>
<td>qf03+01</td>
<td>0.434</td>
<td>19.725</td>
<td>qn05+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>8.300</td>
<td>hk03</td>
<td>0.434</td>
<td>19.725</td>
<td>vk06</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>8.300</td>
<td>sf2+02</td>
<td>0.434</td>
<td>19.725</td>
<td>sn2+01</td>
<td>0.165</td>
</tr>
<tr>
<td>8.605</td>
<td>sf3+02</td>
<td>0.084</td>
<td>20.708</td>
<td>bpm13</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>9.030</td>
<td>qd04+02</td>
<td>0.234</td>
<td>20.825</td>
<td>qn06+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>9.030</td>
<td>vk04</td>
<td>0.234</td>
<td>20.825</td>
<td>hk07</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>9.147</td>
<td>bpm06</td>
<td></td>
<td>23.869</td>
<td>qn07+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>9.235</td>
<td>sd1+05</td>
<td>0.084</td>
<td>23.869</td>
<td>hk08</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>9.975</td>
<td>b+03</td>
<td>1.145</td>
<td>24.603</td>
<td>qn08+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>10.715</td>
<td>sd1+06</td>
<td>0.084</td>
<td>24.603</td>
<td>vk07</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>10.803</td>
<td>bpm07</td>
<td></td>
<td>25.313</td>
<td>b3+01</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>10.920</td>
<td>qd04+03</td>
<td>0.234</td>
<td>26.120</td>
<td>bpm14</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>11.650</td>
<td>qf03+02</td>
<td>0.434</td>
<td>28.800</td>
<td>U250</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>11.650</td>
<td>hk04</td>
<td>0.434</td>
<td>32.997</td>
<td>vk08</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>11.650</td>
<td>sf2+03</td>
<td>0.434</td>
<td>33.731</td>
<td>hk09</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>$s / m$</td>
<td>Element</td>
<td>$l_{\text{eff}} / m$</td>
<td>$s / m$</td>
<td>Element</td>
<td>$l_{\text{eff}} / m$</td>
</tr>
<tr>
<td>--------</td>
<td>---------</td>
<td>----------------</td>
<td>--------</td>
<td>---------</td>
<td>----------------</td>
</tr>
<tr>
<td>31.400</td>
<td>bpm15</td>
<td>46.885</td>
<td>31.400</td>
<td>sd1+09</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>32.288</td>
<td>b3+02</td>
<td>0.570</td>
<td>47.625</td>
<td>b+06</td>
<td>1.145</td>
</tr>
<tr>
<td>32.997</td>
<td>qn08+02</td>
<td>0.234</td>
<td>48.365</td>
<td>sd1+10</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>33.731</td>
<td>qn07+02</td>
<td>0.234</td>
<td>48.453</td>
<td>bpm23</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>36.775</td>
<td>qn06+02</td>
<td>0.234</td>
<td>48.570</td>
<td>qd04+07</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>36.775</td>
<td>hk10</td>
<td>0.234</td>
<td>48.570</td>
<td>vk11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>36.892</td>
<td>bpm16</td>
<td>48.995</td>
<td>48.995</td>
<td>sf3+07</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>37.875</td>
<td>qn05+02</td>
<td>0.234</td>
<td>49.300</td>
<td>qf03+04</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>37.875</td>
<td>vk09</td>
<td>0.234</td>
<td>49.300</td>
<td>hk14</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>37.875</td>
<td>sn2+02</td>
<td>0.165</td>
<td>49.300</td>
<td>sf2+07</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>37.992</td>
<td>bpm17</td>
<td>50.030</td>
<td>50.030</td>
<td>qd04+08</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>39.775</td>
<td>qn04+02</td>
<td>0.234</td>
<td>50.147</td>
<td>bpm24</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>39.775</td>
<td>hk11</td>
<td>0.234</td>
<td>50.235</td>
<td>sd1+11</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>39.892</td>
<td>bpm18</td>
<td>50.975</td>
<td>50.975</td>
<td>b+07</td>
<td>1.145</td>
</tr>
<tr>
<td>40.463</td>
<td>b7+02</td>
<td>0.570</td>
<td>51.715</td>
<td>sd1+12</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>41.545</td>
<td>sd2+03</td>
<td>0.084</td>
<td>51.803</td>
<td>bpm25</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>41.750</td>
<td>qn03+02</td>
<td>0.234</td>
<td>51.920</td>
<td>qd03+02</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>41.867</td>
<td>bpm19</td>
<td>51.920</td>
<td>51.920</td>
<td>vk12</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>42.445</td>
<td>sf3+05</td>
<td>0.084</td>
<td>52.230</td>
<td>dc01</td>
<td>0.095</td>
</tr>
<tr>
<td>42.750</td>
<td>qn02+02</td>
<td>0.434</td>
<td>52.345</td>
<td>sf3+08</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>42.750</td>
<td>hk12</td>
<td>0.434</td>
<td>52.650</td>
<td>qf02+02</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>42.750</td>
<td>sf2+05</td>
<td>0.434</td>
<td>52.650</td>
<td>hk15</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>43.330</td>
<td>qn01+02</td>
<td>0.234</td>
<td>52.650</td>
<td>sf2+08</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>43.330</td>
<td>vk10</td>
<td>0.234</td>
<td>53.930</td>
<td>qd02+02</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>43.330</td>
<td>sn1+02</td>
<td>0.165</td>
<td>53.930</td>
<td>vk13</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>43.447</td>
<td>bpm20</td>
<td>54.047</td>
<td>54.047</td>
<td>bpm26</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>43.535</td>
<td>sd2+04</td>
<td>0.084</td>
<td>54.135</td>
<td>sd1+13</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>44.275</td>
<td>b+05</td>
<td>1.145</td>
<td>54.875</td>
<td>dc02</td>
<td>1.166</td>
</tr>
<tr>
<td>45.015</td>
<td>sd1+08</td>
<td>0.084</td>
<td>54.875</td>
<td>b+08</td>
<td>1.145</td>
</tr>
<tr>
<td>45.103</td>
<td>bpm21</td>
<td>55.615</td>
<td>55.615</td>
<td>sd1+14</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>45.220</td>
<td>qd04+05</td>
<td>0.234</td>
<td>55.703</td>
<td>bpm27</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>45.645</td>
<td>sf3+06</td>
<td>0.084</td>
<td>55.820</td>
<td>qd01+02</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>45.950</td>
<td>qf03+03</td>
<td>0.434</td>
<td>56.960</td>
<td>dc03</td>
<td>0.140</td>
</tr>
<tr>
<td>45.950</td>
<td>hk13</td>
<td>0.434</td>
<td>57.600</td>
<td>qf01+02</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>45.950</td>
<td>sf2+06</td>
<td>0.434</td>
<td>57.600</td>
<td>hk16</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>46.680</td>
<td>qd04+06</td>
<td>0.234</td>
<td>57.600</td>
<td>sf1+02</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>46.797</td>
<td>bpm22</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

<table>
<thead>
<tr>
<th>$s$ / m</th>
<th>Element</th>
<th>$l_{\text{eff}}$ / m</th>
<th>$s$ / m</th>
<th>Element</th>
<th>$l_{\text{eff}}$ / m</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>57.817</td>
<td>bpm28</td>
<td>69.555</td>
<td>59.380</td>
<td>qd01+03</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>59.380</td>
<td>vk14</td>
<td>70.097</td>
<td>59.497</td>
<td>bpm29</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>59.497</td>
<td>sd1+15</td>
<td>70.185</td>
<td>59.585</td>
<td>b+09</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>60.325</td>
<td>dc04</td>
<td>71.665</td>
<td>70.925</td>
<td>b+12</td>
<td>1.145</td>
</tr>
<tr>
<td>61.065</td>
<td>sd1+16</td>
<td>71.870</td>
<td>71.870</td>
<td>qs01+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>61.153</td>
<td>bpm30</td>
<td>71.870</td>
<td>71.870</td>
<td>qs02+01</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>61.270</td>
<td>qd02+03</td>
<td>71.870</td>
<td>71.870</td>
<td>qs03+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>61.270</td>
<td>vk15</td>
<td>72.450</td>
<td>72.450</td>
<td>qs04+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>62.550</td>
<td>qf02+03</td>
<td>72.450</td>
<td>72.450</td>
<td>qs05+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>62.550</td>
<td>hk17</td>
<td>72.450</td>
<td>72.450</td>
<td>qs06+01</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>62.550</td>
<td>sf2+09</td>
<td>73.333</td>
<td>73.333</td>
<td>bpm37</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>62.855</td>
<td>sf3+09</td>
<td>73.450</td>
<td>73.450</td>
<td>bpm38</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>62.970</td>
<td>dc05</td>
<td>73.655</td>
<td>73.655</td>
<td>b7+03</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>63.280</td>
<td>qd03+03</td>
<td>74.738</td>
<td>74.738</td>
<td>b7+03</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>63.280</td>
<td>vk16</td>
<td>75.425</td>
<td>75.425</td>
<td>bpm39</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>63.397</td>
<td>bpm31</td>
<td>75.425</td>
<td>75.425</td>
<td>bpm40</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>63.485</td>
<td>sd1+17</td>
<td>75.425</td>
<td>75.425</td>
<td>bpm41</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>64.225</td>
<td>b+10</td>
<td>76.125</td>
<td>76.125</td>
<td>b3+03</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>64.965</td>
<td>sd1+18</td>
<td>77.325</td>
<td>77.325</td>
<td>b3+03</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>65.053</td>
<td>bpm32</td>
<td>77.325</td>
<td>77.325</td>
<td>b3+03</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>65.170</td>
<td>qd04+09</td>
<td>77.325</td>
<td>77.325</td>
<td>b3+03</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>65.900</td>
<td>qf03+05</td>
<td>77.442</td>
<td>77.442</td>
<td>b3+03</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>65.900</td>
<td>hk18</td>
<td>78.308</td>
<td>78.308</td>
<td>b3+03</td>
<td>0.570</td>
</tr>
<tr>
<td>65.900</td>
<td>sf2+10</td>
<td>78.425</td>
<td>78.425</td>
<td>qf03+06</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>66.205</td>
<td>sf3+10</td>
<td>78.425</td>
<td>78.425</td>
<td>qf03+06</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>66.630</td>
<td>qd04+10</td>
<td>79.364</td>
<td>79.364</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>66.630</td>
<td>vk17</td>
<td>80.838</td>
<td>80.838</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>66.747</td>
<td>bpm33</td>
<td>82.300</td>
<td>82.300</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>66.835</td>
<td>sd1+19</td>
<td>82.913</td>
<td>82.913</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>67.575</td>
<td>b+11</td>
<td>83.625</td>
<td>83.625</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>68.315</td>
<td>sd1+20</td>
<td>83.625</td>
<td>83.625</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>68.403</td>
<td>bpm34</td>
<td>83.625</td>
<td>83.625</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>68.520</td>
<td>qd04+11</td>
<td>84.400</td>
<td>84.400</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>69.250</td>
<td>qf03+06</td>
<td>84.400</td>
<td>84.400</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>69.250</td>
<td>hk19</td>
<td>84.605</td>
<td>84.605</td>
<td>qd04+11</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>69.250</td>
<td>sf2+11</td>
<td>0.434</td>
<td>0.434</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

**Tabelle A.3:** Magnetstruktur des 3. Quadranten des Speicherrings Delta.
<table>
<thead>
<tr>
<th>$s / m$</th>
<th>Element</th>
<th>$l_{\text{eff}} / m$</th>
<th>$s / m$</th>
<th>Element</th>
<th>$l_{\text{eff}} / m$</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>88.195</td>
<td>ss4+02</td>
<td>0.084</td>
<td>103.550</td>
<td>qf03+07</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>88.283</td>
<td>bpm42</td>
<td></td>
<td>103.550</td>
<td>hk28</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>88.400</td>
<td>qs09+02</td>
<td>0.234</td>
<td>103.550</td>
<td>sf2+14</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>88.400</td>
<td>hk24</td>
<td>0.234</td>
<td>104.280</td>
<td>qd04+14</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>89.058</td>
<td>bpm43</td>
<td></td>
<td>104.397</td>
<td>bpm49</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>89.175</td>
<td>qs08+02</td>
<td>0.234</td>
<td>104.485</td>
<td>sd1+23</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>89.175</td>
<td>vk21</td>
<td>0.234</td>
<td>105.225</td>
<td>b+14</td>
<td>1.145</td>
</tr>
<tr>
<td>89.175</td>
<td>ss3+02</td>
<td>0.165</td>
<td>105.965</td>
<td>sd1+24</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>89.888</td>
<td>b3+04</td>
<td>0.570</td>
<td>106.053</td>
<td>bpm50</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>92.001</td>
<td>U55</td>
<td></td>
<td>106.170</td>
<td>qd04+15</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>94.375</td>
<td>qs07+02</td>
<td>0.234</td>
<td>106.170</td>
<td>vk24</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>94.375</td>
<td>hk25</td>
<td>0.234</td>
<td>106.595</td>
<td>sf3+15</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>94.492</td>
<td>bpm44</td>
<td></td>
<td>106.900</td>
<td>qf03+08</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>95.358</td>
<td>bpm45</td>
<td></td>
<td>106.900</td>
<td>hk29</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>95.475</td>
<td>qs06+02</td>
<td>0.234</td>
<td>106.900</td>
<td>sf2+15</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>95.475</td>
<td>vk22</td>
<td>0.234</td>
<td>107.630</td>
<td>qd04+16</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>95.475</td>
<td>ss2+02</td>
<td>0.165</td>
<td>107.747</td>
<td>bpm51</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>96.675</td>
<td>qs05+02</td>
<td>0.234</td>
<td>107.835</td>
<td>sd1+25</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>97.375</td>
<td>qs04+02</td>
<td>0.234</td>
<td>108.575</td>
<td>b+15</td>
<td>1.145</td>
</tr>
<tr>
<td>97.375</td>
<td>hk26</td>
<td>0.234</td>
<td>109.315</td>
<td>sd1+26</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>98.063</td>
<td>b7+04</td>
<td>0.570</td>
<td>109.403</td>
<td>bpm52</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>99.145</td>
<td>sd2+07</td>
<td>0.084</td>
<td>109.520</td>
<td>qd03+04</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>99.350</td>
<td>qs03+02</td>
<td>0.234</td>
<td>109.520</td>
<td>vk25</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>99.467</td>
<td>bpm46</td>
<td></td>
<td>109.945</td>
<td>sf3+16</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>100.045</td>
<td>sf3+13</td>
<td>0.084</td>
<td>110.250</td>
<td>qf02+04</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>100.350</td>
<td>qs02+02</td>
<td>0.434</td>
<td>110.250</td>
<td>hk30</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>100.350</td>
<td>hk27</td>
<td>0.434</td>
<td>110.250</td>
<td>sf2+16</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>100.350</td>
<td>sf2+13</td>
<td>0.434</td>
<td>111.530</td>
<td>qd02+04</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>100.930</td>
<td>qs01+02</td>
<td>0.234</td>
<td>111.530</td>
<td>vk26</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>100.930</td>
<td>vk23</td>
<td>0.234</td>
<td>111.647</td>
<td>bpm53</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>100.930</td>
<td>ss1+02</td>
<td>0.165</td>
<td>111.735</td>
<td>sd1+27</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>101.047</td>
<td>bpm47</td>
<td></td>
<td>112.475</td>
<td>b+16</td>
<td>1.145</td>
</tr>
<tr>
<td>101.135</td>
<td>sd2+08</td>
<td>0.084</td>
<td>113.215</td>
<td>sd1+28</td>
<td>0.084</td>
</tr>
<tr>
<td>101.875</td>
<td>b+13</td>
<td>1.145</td>
<td>113.303</td>
<td>bpm54</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>102.615</td>
<td>sd1+22</td>
<td>0.084</td>
<td>113.420</td>
<td>qd01+04</td>
<td>0.234</td>
</tr>
<tr>
<td>102.703</td>
<td>bpm48</td>
<td></td>
<td>115.200</td>
<td>qf01+01</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>102.820</td>
<td>qd04+13</td>
<td>0.234</td>
<td>115.200</td>
<td>hk01</td>
<td>0.434</td>
</tr>
<tr>
<td>103.245</td>
<td>sf3+14</td>
<td>0.084</td>
<td>115.200</td>
<td>sf1+01</td>
<td>0.434</td>
</tr>
</tbody>
</table>

A.2. Ergebnisse der geodätischen Vermessung

Im Rahmen einer geodätischen Vermessung des gesamten Speicherrings wurden die Abweichungen der Magnetpositionen zu den Designpositionen ermittelt. Tabelle A.5 enthält die Ergebnisse für die Positionsabweichungen der Dipole und der Quadrupole in radialer Richtung $\Delta r$, in Längsrichtung $\Delta s$ sowie in der Höhe $\Delta z$, jeweils strahleingangs- und strahl-ausgangsseitig [59]. Die ursprünglichen Quadrupol-Positionen, die im Rahmen dieser Arbeit korrigiert worden sind, sind gelb markiert.

Im Anschluss an die geodätische Vermessung wurden im Rahmen dieser Arbeit die Positionen der BPMs bestimmt, indem die Abstände der Mitten der BPM-Köpfe zum jeweils nächsten Magneten mit einem Maßband gemessen und daraus die $s$-Positionen der BPM-Köpfe berechnet wurden. Die dabei erreichte Genauigkeit von $\pm 1$ mm verbessert die bisherige Genauigkeit im Modell um ein bis zwei Größenordnungen. Den Ergebnissen in Tabelle A.6 ist zu entnehmen, dass die Positionen der meisten BPMs um mehr als 10 mm falsch waren, bei drei BPMs sogar deutlich über 100 mm.
### Tabelle A.5: Abweichungen der Delta-Magnete von den Designpositionen laut geodätischer Vermessung [59].

<table>
<thead>
<tr>
<th>Magnet</th>
<th>Δx / mm</th>
<th>Δy / mm</th>
<th>Δz / mm</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>qf01</td>
<td>-3.5</td>
<td>2.4</td>
<td>0.5</td>
</tr>
<tr>
<td>qf02</td>
<td>0.7</td>
<td>2.5</td>
<td>0.2</td>
</tr>
<tr>
<td>qf03</td>
<td>7.0</td>
<td>0.5</td>
<td>0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>b10</td>
<td>-3.4</td>
<td>1.1</td>
<td>0.5</td>
</tr>
<tr>
<td>b12</td>
<td>-2.1</td>
<td>4.5</td>
<td>0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>b14</td>
<td>1.4</td>
<td>1.6</td>
<td>0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>b15</td>
<td>0.1</td>
<td>0.3</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b16</td>
<td>1.6</td>
<td>-0.1</td>
<td>0.8</td>
</tr>
<tr>
<td>b12</td>
<td>-1.7</td>
<td>0.3</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b14</td>
<td>0.2</td>
<td>-0.1</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b15</td>
<td>0.4</td>
<td>0.0</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b16</td>
<td>0.6</td>
<td>0.0</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b14</td>
<td>0.2</td>
<td>-0.1</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b15</td>
<td>-2.5</td>
<td>1.0</td>
<td>-0.4</td>
</tr>
<tr>
<td>b16</td>
<td>-2.5</td>
<td>1.0</td>
<td>-0.4</td>
</tr>
</tbody>
</table>

### Tabelle A.6: Ergebnisse der geodätischen Vermessung

<table>
<thead>
<tr>
<th>Magnet</th>
<th>Δx / mm</th>
<th>Δy / mm</th>
<th>Δz / mm</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>qf01</td>
<td>-3.5</td>
<td>2.4</td>
<td>0.5</td>
</tr>
<tr>
<td>qf02</td>
<td>0.7</td>
<td>2.5</td>
<td>0.2</td>
</tr>
<tr>
<td>qf03</td>
<td>7.0</td>
<td>0.5</td>
<td>0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>b10</td>
<td>-3.4</td>
<td>1.1</td>
<td>0.5</td>
</tr>
<tr>
<td>b12</td>
<td>-2.1</td>
<td>4.5</td>
<td>0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>b14</td>
<td>1.4</td>
<td>1.6</td>
<td>0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>b15</td>
<td>0.1</td>
<td>0.3</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b16</td>
<td>1.6</td>
<td>-0.1</td>
<td>0.8</td>
</tr>
<tr>
<td>b14</td>
<td>-1.7</td>
<td>0.3</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b15</td>
<td>0.4</td>
<td>0.0</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b16</td>
<td>0.6</td>
<td>0.0</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b14</td>
<td>0.2</td>
<td>-0.1</td>
<td>0.0</td>
</tr>
<tr>
<td>b15</td>
<td>-2.5</td>
<td>1.0</td>
<td>-0.4</td>
</tr>
<tr>
<td>b16</td>
<td>-2.5</td>
<td>1.0</td>
<td>-0.4</td>
</tr>
<tr>
<td>BPM</td>
<td>nächster Magnet</td>
<td>$\Delta s_M$ / mm</td>
<td>$\Delta s$ / mm</td>
</tr>
<tr>
<td>---------</td>
<td>----------------</td>
<td>------------------</td>
<td>----------------</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm01</td>
<td>qf01+01</td>
<td>28.0</td>
<td>13.0</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm02</td>
<td>qd01+01</td>
<td>23.0</td>
<td>8.3</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm03</td>
<td>qd02+01</td>
<td>33.0</td>
<td>-13.5</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm04</td>
<td>qd03+01</td>
<td>25.0</td>
<td>13.9</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm05</td>
<td>qd04+01</td>
<td>25.0</td>
<td>-6.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm06</td>
<td>qd04+02</td>
<td>29.0</td>
<td>11.9</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm07</td>
<td>qd04+03</td>
<td>31.0</td>
<td>-9.6</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm08</td>
<td>qd04+04</td>
<td>32.0</td>
<td>17.5</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm09</td>
<td>qn01+01</td>
<td>23.0</td>
<td>-3.7</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm10</td>
<td>qn03+01</td>
<td>26.0</td>
<td>-4.6</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm11</td>
<td>qn04+01</td>
<td>43.0</td>
<td>-25.9</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm12</td>
<td>qn05+01</td>
<td>38.0</td>
<td>-22.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm13</td>
<td>qn06+01</td>
<td>35.5</td>
<td>-18.7</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm14</td>
<td>b3+01</td>
<td>661.0</td>
<td>115.3</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm15</td>
<td>b3+02</td>
<td>665.0</td>
<td>-29.7</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm16</td>
<td>qn06+02</td>
<td>43.0</td>
<td>27.9</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm17</td>
<td>qn05+02</td>
<td>47.5</td>
<td>33.3</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm18</td>
<td>qn04+02</td>
<td>47.0</td>
<td>31.7</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm19</td>
<td>qn03+02</td>
<td>27.5</td>
<td>12.5</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm20</td>
<td>qn01+02</td>
<td>25.0</td>
<td>10.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm21</td>
<td>qd04+05</td>
<td>27.0</td>
<td>-10.2</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm22</td>
<td>qd04+06</td>
<td>28.0</td>
<td>12.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm23</td>
<td>qd04+07</td>
<td>33.0</td>
<td>-12.8</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm24</td>
<td>qd04+08</td>
<td>26.0</td>
<td>11.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm25</td>
<td>qd03+02</td>
<td>31.0</td>
<td>-10.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm26</td>
<td>qd02+02</td>
<td>19.0</td>
<td>2.7</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm27</td>
<td>qd01+02</td>
<td>35.0</td>
<td>-17.3</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm28</td>
<td>qf01+02</td>
<td>30.0</td>
<td>12.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm29</td>
<td>qd01+03</td>
<td>23.0</td>
<td>6.9</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm30</td>
<td>qd02+03</td>
<td>29.0</td>
<td>-11.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm31</td>
<td>qd03+03</td>
<td>31.0</td>
<td>13.6</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm32</td>
<td>qd04+09</td>
<td>27.5</td>
<td>-8.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm33</td>
<td>qd04+10</td>
<td>24.0</td>
<td>8.0</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm34</td>
<td>qd04+11</td>
<td>28.0</td>
<td>-9.8</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm35</td>
<td>qd04+12</td>
<td>17.0</td>
<td>2.3</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm36</td>
<td>qs01+01</td>
<td>35.0</td>
<td>-16.7</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm37</td>
<td>qs03+01</td>
<td>34.0</td>
<td>-17.1</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm38</td>
<td>qs06+01</td>
<td>38.0</td>
<td>18.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm39</td>
<td>qs07+01</td>
<td>42.0</td>
<td>-24.6</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm40</td>
<td>qs07+01</td>
<td>1017.0</td>
<td>178.4</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm41</td>
<td>b3+03</td>
<td>484.0</td>
<td>-130.7</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm42</td>
<td>qs09+02</td>
<td>36.0</td>
<td>-9.2</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm43</td>
<td>qs08+02</td>
<td>32.5</td>
<td>-15.9</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm44</td>
<td>qs07+02</td>
<td>31.0</td>
<td>16.0</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm45</td>
<td>qs06+02</td>
<td>31.0</td>
<td>-12.6</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm46</td>
<td>qs03+02</td>
<td>28.0</td>
<td>9.6</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm47</td>
<td>qs01+02</td>
<td>30.0</td>
<td>12.9</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm48</td>
<td>qd04+13</td>
<td>27.0</td>
<td>-9.5</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm49</td>
<td>qd04+14</td>
<td>31.0</td>
<td>12.3</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm50</td>
<td>qd04+15</td>
<td>25.0</td>
<td>-8</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm51</td>
<td>qd04+16</td>
<td>40.0</td>
<td>22.9</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm52</td>
<td>qd03+04</td>
<td>19.0</td>
<td>1.0</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm53</td>
<td>qd02+04</td>
<td>23.0</td>
<td>10.8</td>
</tr>
<tr>
<td>bpm54</td>
<td>qd01+04</td>
<td>27.0</td>
<td>-8.8</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**Tabelle A.6:** Abstände $\Delta s_M$ der BPMs zum jeweils nächsten Magneten und Abweichungen $\Delta s$ der BPMs von den Designpositionen.
Abbildungsverzeichnis

2.1. Übersicht der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA ........................................... 3
3.1. Koordinatensystem zur Beschreibung der Teilchenbahn ........................................ 8
3.2. Dispersionsbahnen für Teilchen mit Impulsabweichung ......................................... 11
3.3. Verlauf der Einzelteilchenbahnen innerhalb der Enveloppe .................................... 12
3.4. Phasenraumellipse .................................................................................................. 13
3.5. Arbeitspunktdiagramm ............................................................................................ 15
4.1. Hysteresekurve für Eisen .......................................................................................... 19
4.2. Aufbau eines Dipol-Magneten .................................................................................. 20
4.3. Prinzip der schwachen Fokussierung ....................................................................... 21
4.4. Prinzip der Kantenfokussierung ............................................................................. 21
4.5. Ablenkung der Teilchenbahn durch ein zusätzliches Dipol-Feld ............................... 23
4.6. Aufbau eines Quadrupol-Magneten ......................................................................... 25
4.7. Teilchenbahn durch eine Quadrupol-Struktur .......................................................... 26
4.8. Positionen der Quadrupole im Speicherring Delta .................................................... 29
4.9. Quadrupol-Triplett .................................................................................................. 30
4.10. Abbildung eines Achsenpunktes ins Unendliche ...................................................... 30
4.11. Höhenjustage der Quadrupol-Magnete .................................................................. 31
4.12. Radiale Justage der Quadrupol-Magnete ................................................................ 31
4.13. Zeichnung eines Delta-Quadrupols ....................................................................... 32
4.15. Korrektur der Chromatizität mit Hilfe von Sextupolen .......................................... 36
4.16. Sextupole und Dipol-Korrekturen ........................................................................ 38
4.17. Polspulen der internen Sextupole .......................................................................... 38
5.1. Querschnitt durch einen Strahl lagemonitor ............................................................ 41
5.2. Positionen der Strahl lagemonitore im Speicherring Delta ........................................ 44
5.3. Spulen der Dipol-Korrekturen an den Quadrupol-Jochen ......................................... 45
5.4. Positionen der Korrekturen im Speicherring Delta .................................................... 47
5.5. Prinzip einer Orbitbeule .......................................................................................... 50
6.1. Lage der Strahlkammer im Quadrupol ...................................................................... 55
6.2. Standard-Monitorkopf ............................................................................................. 56
6.3. Verlauf der Vaku umkammer durch die Magnetstruktur ........................................ 57
6.4. Transversale Abweichungen der Quadrupole von den Designpositionen ............... 58
6.5. Mobiler Wegaufnehmer am Quadrupol .................................................................... 59
6.6. Taylor-Hobson-Kugel .............................................................................................. 61
6.7. Aufbau für die geodätische Vermessung .................................................................. 61
Abbildungsverzeichnis

6.8. Hardware-Ebenen des DELTA-Kontrollsystems .................................. 62
7.1. Mit MAD simulierte Strahlparameter .................................................. 66
7.2. Mit der AT simulierte Strahlparameter, longitudinale Korrekturen .......... 71
7.3. Mit der AT simulierte Strahlparameter, transversale Korrekturen .......... 71
7.4. Mit der AT simulierte Strahlparameter, Multipolkomponenten .............. 74
7.5. Orbitabweichung ohne Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen . 78
7.6. Mit der AT simulierte Strahlparameter ................................................ 78
7.7. Orbitabweichung unter Berücksichtigung transversaler Fehlaufstellungen 79
7.8. Mit der AT simulierte Strahlparameter ................................................ 79
7.9. Orbitabweichung für eine linearisierte Optik ........................................ 80
7.10. Mit der AT simulierte Strahlparameter .............................................. 80
7.11. Vergleich der Response-Vektoren für hk01 ........................................ 83
7.12. Vergleich der Response-Vektoren für vk01 ........................................ 83
7.13. Gemessener Orbit für die Delta-Standardoptik .................................... 85
7.14. Orbiteinhüllende für Korrektorfeldfehler .......................................... 86
7.15. Arbeitspunkte und Chromatizitäten für Korrektorfeldfehler ............... 86
7.16. Orbiteinhüllende für Quadrupol-Positionsfehler ................................ 87
7.17. Arbeitspunkte und Chromatizitäten für Quadrupol-Positionsfehler ....... 87

8.1. Schematische Darstellung der strahlbasierten Messung ....................... 91
8.2. Winkelverhältnisse zur Berechnung der Dreieckshöhe .......................... 92
8.3. Strahlverläufe im fokussierenden Quadrupol ...................................... 94
8.4. Strahlverläufe im defokussierenden Quadrupol ................................... 95
8.5. Berechnung der Fehlaufstellung des ersten Quadrupols ..................... 96
8.6. Ergebnis einer BBC mit eingeschaltetem Korrektor ................................ 98
8.7. Mechanische Messuhr mit Haltearm ................................................... 101
8.8. Positionen der verschobenen Quadrupole im Speicherring Delta ............ 106

9.1. Wegaufnehmerhalterung ........................................................................ 110
9.2. Wegaufnehmerhalterungen an den Quadrupol-Jochen ......................... 111
9.3. Wegaufnehmerelektronik ..................................................................... 112
9.4. Ausgangsspannung eines Wegaufnehmers, 2 mm horizontal ............... 113
9.5. Ausgangsspannung eines Wegaufnehmers, 4 mm horizontal ............... 114
9.6. Ausgangsspannung eines Wegaufnehmers, 1 mm vertikal .................... 114
Tabellenverzeichnis

4.1. Konstanten zur Berechnung der Delta-Strahlenergie .......................... 24
4.2. Messdaten der Quadrupol-Netzgeräte-Kalibration ............................ 34

7.1. Vergleich der simulierten Strahlparameter von MAD und AT .............. 67
7.2. Mit der AT simulierte Strahlparameter, Positionskorrekturen ............... 70
7.3. Integrale Korrektorstärken .................................................. 73
7.4. Integrale Sextupol-Stärken .................................................. 73
7.5. Mit der AT simulierte Strahlparameter, Multipolkomponenten ............... 73
7.6. Sextupol-Komponenten der Dipol-Randfelder ................................ 75
7.7. Vergleich von simulierten und gemessenen Strahlparametern ............... 77
7.8. Vergleich von simulierten und gemessenen Strahlparametern ............... 77
7.9. Mit der AT simulierte Strahlparameter, Sextupol-Komponenten ............... 81

8.1. Messdaten und Berechnung der Fehlaufstellung des Quadrupols qd01+04 . 103
8.2. Parameter zur Berechnung der Fehlaufstellung des Quadrupols qd01+04 . 103
8.3. Integrale Korrektorstärken vor und nach den Korrekturen .................. 107

A.1. Magnetstruktur des 1. Quadranten .......................................... 120
A.2. Magnetstruktur des 2. Quadranten .......................................... 121
A.5. Abweichungen der Delta-Magnete von den Designpositionen ............... 125
A.6. Abweichungen der BPMs von den Designpositionen ........................ 126
Literaturverzeichnis

   Homepage
   http://www.aps.anl.gov/epics

   Localizing Impedance Sources from Betatron Phase Beating in the CERN SPS
   European Particle Accelerator Conference (EPAC), Juli 2004, Seiten 1936-1938

   Homepage
   http://www.beckhoff.de

   Private Korrespondenz
   Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, 2009

   Lehrbuch der Experimentalphysik II: Elektromagnetismus
   Walter de Gruyter, 2006

[6] Bergoz Instrumentation
   Homepage
   http://www.bergoz.com

[7] F. Brinker
   Variable integrierte Sextupole für Speicherringe
   Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, August 1993

[8] E. Courant, H. Snyder
   Theory of the Alternating Gradient Synchrotron
   Annals of Physics, Band 3, Nummer 1, 1958, Seiten 1-48

[9] Zentrum für Synchrotronstrahlung (DELTA)
   Homepage
   http://www.delta.tu-dortmund.de
Literaturverzeichnis

[10] **L. Duda**  
*Untersuchungen zur elektronischen und atomaren Struktur von SiC-Oberflächen*  
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Januar 2000

*Homepage*  
http://www.emersonembeddedcomputing.com

[12] **esd electronic system design gmbh**  
*Homepage*  
http://www.esd-electronics.com

[13] **R. Feynman**  
*Vorlesungen über Physik II: Elektromagnetismus und Struktur der Materie*  
Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001

[14] **Fluke Corporation**  
*Homepage*  
http://www.fluke.de

[15] **M. Grewe**  
*Dokumentation integraler Magnetvermessungen einiger DELTA-Magnete*  
Interner Bericht, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Februar 2005

[16] **M. Grewe**  
i2k Version 3.53  
Quelltext, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, September 2003

[17] **M. Grewe**  
*SVD-basierte Orbitkorrektur am Speicherring DELTA*  
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Januar 2005

[18] **P. Hartmann, J. Fürsch, D. Schirmer, T. Weis, K. Wille**  
*Experience with Libera Beam Position Monitors at DELTA*  
European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC), 2007, Seiten 111-113

[19] **P. Hartmann**  
*Private Korrespondenz*  
Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, 2009

[20] **R. Heine**  
*Untersuchung der Wechselwirkung intensiver Elektronenstrahlen mit höheren Resonatormoden an Delta*  
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Oktober 2006
[21] R. Heisterhagen
Entwicklung eines neuartigen Emittanzmonitors mit elektrostatischen Elektroden
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, August 1993

[22] F. Hinterberger
Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik
Springer-Verlag, 2008

[23] B. Hippert, N. Marquardt
The DELTA Vacuum System
European Particle Accelerator Conference (EPAC), Juni 1996, Seiten 364-366

[24] H. Huck
Optimierung des Free Electron Lasers am Speicherring Delta im Multibunch-Mode
Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Februar 2003

[25] H. Ingensand
Einführung in die Geodätische Messtechnik
Vorlesungsskript, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2004

[26] Instrumentation Technologies d.d.
Homepage
http://www.i-tech.si

[27] Intel Corporation
Homepage
http://www.intel.com

[28] F. Iselin
European Organization for Nuclear Research (CERN), 1994

[29] A. Jankowiak
Kalibration der DELTA-Strahllagemonitore
Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, März 1994

Strahldiagnose und Closed-Orbit-Charakterisierung mit HF-Strahllagemonitoren am Beispiel der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, November 1999
Messgenauigkeit der induktiven Wegaufnehmer bei DELTA unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren
Projektarbeit, Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, Januar 2009

[32] O. Kopitetzki, D. Schirmer, G. Schmidt, K. Wille
Beam Based Alignment of Quadrupole Triplets by Use of MATLAB Based Modeling
European Particle Accelerator Conference (EPAC), Juni 2008, Seiten 1341-1343

[33] O. Kopitetzki
Messung aller Response-Vektoren und Vergleich mit der MATLAB-Simulation
Interner Bericht, Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, Juni 2009

[34] O. Kopitetzki
Vermessung und Modellierung der Optik des Speicherrings Delta
Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Juli 2005

Advanced Photon Source (APS), Argonne National Laboratory, 2004

[36] F. Löffler
Evolution of the Accelerator Alignment Methods at DESY over the past thirty years
International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA), Oktober 1997

[37] The MathWorks, Inc.
Homepage
http://www.mathworks.de

[38] A. Mooser
Optik geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern
Institut für Kernphysik, Johannes Gutenberg Universität Mainz, Oktober 2006

A Method to Measure the Beta-Beating in a 90 Degrees Phase Advance Lattice
European Particle Accelerator Conference (EPAC), Juni 2000, Seiten 1792-1794

[40] Motorola, Inc.
Homepage
http://www.motorola.com

[41] J. Murphy
Synchrotron Light Source Data Book
National Synchrotron Light Source (NSLS), Brookhaven National Laboratory, 1993
[42] MySQL AB / Sun Microsystems, Inc.  
   Homepage  
   http://www.mysql.de

[43] M. Negrazus, A. Peters  
   SAW - A Superconducting Asymmetric Multipole Wiggler at the DELTA Storage Ring  
   European Particle Accelerator Conference (EPAC), Juni 1996

   A New Storage-Ring FEL Facility at the University of Dortmund  
   Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Band 296, 1990, Seite 263

   An Accelerator Control Middle Layer Using MATLAB  
   Particle Accelerator Conference (PAC), 2005, Seiten 4009-4011

[46] J. Prenting  
   Anforderungen an die Justiergenauigkeit von Teilchenbeschleunigern  
   Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

[47] K. Reimann  
   Korrekturnetzgeräte HERA e− Ring  
   Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Juni 1992

[48] H. Quick  
   First Laser Operation of FELICITA I in the Visible  
   Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Oktober 1999

[49] H. Rast  
   noch nicht veröffentlicht  
   Diplomarbeit, Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, 2010

[50] T. Roy  
   Optimierung des DELTA-Speicherringes für den Betrieb des neuen supraleitenden Wigglermagneten  
   Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, März 1999

[51] K. Saito  
   SCRF Test Facilities Towards the ILC  
   European Particle Accelerator Conference (EPAC), Juni 2006, Seiten 5-9

[52] M. Sands  
   The Physics of Electron Storage Rings  
   Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), Stanford University, November 1970
Literaturverzeichnis

[53] **D. Schirmer**  
*Entwicklung von Strahloptiken für den Testspeicherring DELTA auf Basis der Trippett-Struktur*  
Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Dezember 1989

[54] **D. Schirmer**  
*Entwurf und Auslegung eines supraleitenden, asymmetrischen Multipol-Wigglers zur Erzeugung intensiver Röntgenstrahlung mit variabler Polarisation am 1.5 GeV Elektronenspeicherring DELTA*  
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Mai 1994

[55] **D. Schirmer**  
_Private Korrespondenz_  
Fachbereich Physik, Universität Dortmund, 2005

_Status of the Synchrotron Light Source DELTA_  
European Particle Accelerator Conference (EPAC), Juli 2004, Seiten 2293-2295

[57] **G. Schmidt**  
*Beam Dynamic Studies in Cycling and Storage Mode on the ESRF Fast Cycling Booster Synchrotron*  
Dissertation, Abteilung Physik, Universität Dortmund, Februar 1996

[58] **G. Schmidt**  
*Position Sensors for Monitoring Accelerator Magnet Motion at DELTA*  
European Particle Accelerator Conference (EPAC), Juni 2002, Seiten 2658-2660

[59] **G. Schmidt**  
_Private Korrespondenz_  
Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, 2009

[60] **G. Schmidt**  
_Vakuumumbau Juli bis Oktober 2003_  
Interner Bericht, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Oktober 2003

[61] **T. Schmidt**  
*Aufbau des FEL Experiments FELICITA I im sichtbaren und ultraviolettischen Spektralbereich am Speicherring DELTA*  
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Juli 1997
[62] W. Schwarz
Vermessungen im Sub-Millimeter-Bereich: Anwendungsbeispiele aus der Industrie- und Präzisionsvermessung, Teil 1
Mitteilungen des DVW Bayern e. V. Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Band 4, 2006, Seiten 587-608

[63] J. Stolze
Thermodynamik und Statistik
Vorlesungsskript, Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, Februar 2003

[64] T. Straumann
labCA - An EPICS Channel Access Interface for scilab and matlab
Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), Stanford University, May 2008

[65] Taylor Hobson Ltd / AMETEK, Inc.
Homepage
http://www.taylor-hobson.com

[66] Tcl Developer Xchange
Homepage
http://www.tcl.tk

[67] A. Terebilo
Accelerator Toolbox for MATLAB
Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), Stanford University, Mai 2001

[68] P. Towalski
Private Korrespondenz
Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, 2009

[69] TWK-ELEKTRONIK GmbH
Homepage
http://www.twk.de

[70] TWK-ELEKTRONIK GmbH
Induktive Wegaufnehmer: Modellreihe IW 150
Datenblatt, Juli 2007

[71] W. Untersweg
Prüfstand zur Messung mechanischer Größen
Diplomarbeit, Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung, Technische Universität Graz, Juli 1999
Literaturverzeichnis

[72] T. Weis  
Einführung in die Beschleunigerphysik  
Vorlesungsskript, Fakultät Physik, Technische Universität Dortmund, 2008

[73] T. Weis  
Kollektive Effekte intensiver Teilchenstrahlen  
Vorlesungsskript, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, 2003

[74] H. Wiedemann  
Particle Accelerator Physics I: Basic Principles and Linear Beam Dynamics  
Springer-Verlag, 2003

[75] H. Wiedemann  
Particle Accelerator Physics II: Nonlinear and Higher-Order Beam Dynamics  
Springer-Verlag, 2003

Homepage  
http://de.wikipedia.org

[77] Wikipedia  
Homepage  
http://en.wikipedia.org

[78] K. Wille  
Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen  
B. G. Teubner, 1992

[79] Wind River  
Homepage  
http://www.windriver.com

[80] Otto Wolff Präzisionswiderstände

[81] D. Zimoch  
Entwicklung von Strahldiagnosetools unter Berücksichtigung objektorientierter Ansätze  
Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Juli 1996

[82] D. Zimoch  
Implementierung eines Orbitkorrektursystems an der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA  
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, September 2002

[83] E. Zimoch  
Entwicklung und Einsatz eines intelligenten Agentensystems zur Optimierung der Injekt-
tion in den Speicherring der Synchrotronstrahlungsquelle DELTA
Dissertation, Fachbereich Physik, Universität Dortmund, Dezember 2003
Danksagung

Mein Dank gilt allen, die mich bei der Vorbereitung und Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Klaus Wille für die Vergabe des Themas und die Unterstützung meiner Forschung. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Bernhard Spaan für die Begutachtung dieser Arbeit.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Gerald Schmidt und Herrn Dr. Detlef Schirmer, die mir während dieser Zeit mit Rat und Tat zur Seite standen, für die Durchsicht dieser Arbeit sowie die hilfreichen Diskussionen. Dafür danke ich auch den Herren Dr. Peter Hartmann, Jochem Friedl und Helge Rast.

Besonders danke ich auch Herrn Dr. Ulf Berges für die Unterstützung bei der Verschiebung der Quadrupole sowie die Durchführung der geodätischen Vermessungen sowie Herrn Thomas Dybiona und Herrn Andreas Erpelding für die Unterstützung bei der Konstruktion und Fertigung der Haltearme und der Elektroniken für die Wegaufnehmer.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeitern des Zentrums für Synchrotronstrahlung für ihre Hilfsbereitschaft und ihre fachlichen Anregungen.

Abschließender Dank gebührt natürlich meinen Eltern, deren Unterstützung mir dieses Studium ermöglichte.