

---

**Automatisierung der Emittanzmessung  
in der externen Strahlführung  
der Beschleunigeranlage ELSA**

---

**Bachelorarbeit in Physik**  
von  
**Josefa Oberem**

angefertigt am  
**Physikalischen Institut der Universität Bonn**

vorgelegt der  
**Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät**  
der  
**Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn**

**Juni 2010**

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Referent: PD Dr. W. Hillert  
Koreferent: Prof. Dr. H. Schmieden

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Strahldynamik und -parameter</b>	<b>3</b>
2.1 Transversale Strahldynamik . . . . .	3
2.2 Dispersion . . . . .	4
2.3 Emittanz und Twissparameter . . . . .	5
<b>3 Resonanzextraktion</b>	<b>7</b>
<b>4 Matrixformalismus</b>	<b>8</b>
4.1 Transformationsmatrizen . . . . .	8
4.2 Transformation der Twissparameter . . . . .	9
<b>5 Verfahren zur Emittanzmessung</b>	<b>10</b>
5.1 Quadrupolscan . . . . .	10
5.2 Matrizenoptik in der Extraktion . . . . .	11
5.3 Dispersionsmessung . . . . .	12
5.4 Emittanzmessung . . . . .	14
<b>6 Programmbeschreibung</b>	<b>15</b>
6.1 Anmerkungen zum Flussdiagramm . . . . .	15
6.2 Programmbedienung . . . . .	15
6.3 Programm zur Dispersionsmessung . . . . .	16
6.4 Programm zur Emittanzmessung . . . . .	18
<b>7 Auswertung der Programmergebnisse</b>	<b>20</b>
7.1 Dispersionsmessung . . . . .	20
7.2 Emittanzmessung . . . . .	22
<b>8 Fazit und Ausblick</b>	<b>26</b>
8.1 Erweiterung des Programms . . . . .	26
8.2 Schwierigkeiten der Messmethode . . . . .	26
<b>Literatur</b>	<b>28</b>
	<b>29</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>30</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>30</b>
<b>Anhang</b>	<b>31</b>
<b>A Bilder</b>	<b>31</b>
<b>B Tabellen</b>	<b>32</b>

<b>C</b>	<b>Quelltexte des Programms</b>	<b>35</b>
C.1	Dispersionsmessung . . . . .	35
C.2	Emittanzmessung . . . . .	39
C.2.1	Hauptprogramm Emittanzmessung . . . . .	39
C.2.2	Unterprogramm Extraktionsarbeitspunkt . . . . .	40
C.2.3	Unterprogramm Sextupolstärke . . . . .	45
C.2.4	Unterprogramm Quadrupolschleife . . . . .	49
C.2.5	Unterprogramm Fit . . . . .	50
C.2.6	Unterprogramm CaseN . . . . .	52

## 1 Einleitung

Die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA am Physikalischen Institut der Universität Bonn besteht aus drei Beschleunigerstufen. Die erste Stufe bildet ein Injektions-LINAC<sup>1</sup>, der das Booster-Synchrotron befüllt, welches als zweite Stufe zur Vorbeschleunigung dient. Die letzte Stufe besteht aus dem Stretcherring, der zur Namensgebung von ELSA geführt hat. Eine vollständige Abbildung des Beschleunigers befindet sich im Anhang (vgl. Abbildung A.1).

Der Strahl von unpolarisierten und polarisierten Elektronen kann auf eine Maximalenergie von bis zu 3.5 GeV beschleunigt werden. Somit können mit ELSA Experimente der Mittelenergiephysik durchgeführt werden. Die Elektronen können zu einem der beiden Experimentierplätze kontinuierlich mit der Methode der Resonanzextraktion extrahiert oder im Stretcherring gespeichert werden. Es handelt sich bei den externen Strahlführungen um die ELAN-Strahlführung<sup>2</sup>, die zum Crystal-Barrel-Experiment<sup>3</sup> führt, sowie die Saphir-Strahlführung<sup>4</sup>, an deren Ende zur Zeit ein neues Experiment namens BGO-OD<sup>5</sup> aufgebaut wird (vgl. Abbildung 1.1). Diese Experimente sind auf eine hohe Strahlqualität angewiesen, die unter anderem von der Strahlbreite abhängt. Eine wichtige Eigenschaft des Strahls stellt die Emittanz dar. Sie entspricht der Fläche, die ein Teilchenstrahl im Phasenraum ausfüllt (vgl. Kapitel 2.3).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Messungen der horizontalen Emittanz, die in der SAPHIR-Strahlführung vorgenommen wurden. Dazu sind folgende Komponenten des Beschleunigers im Bereich der Extraktion von Bedeutung: Die Dipole MB2 und MB1 werden zur Strahlableitung, der SSH2 ist ebenfalls ein Dipol, der jedoch zur Strahlkorrektur dient, schließlich sind QD1 sowie QF1 Quadrupole, die zur Fokussierung des Strahls beitragen.

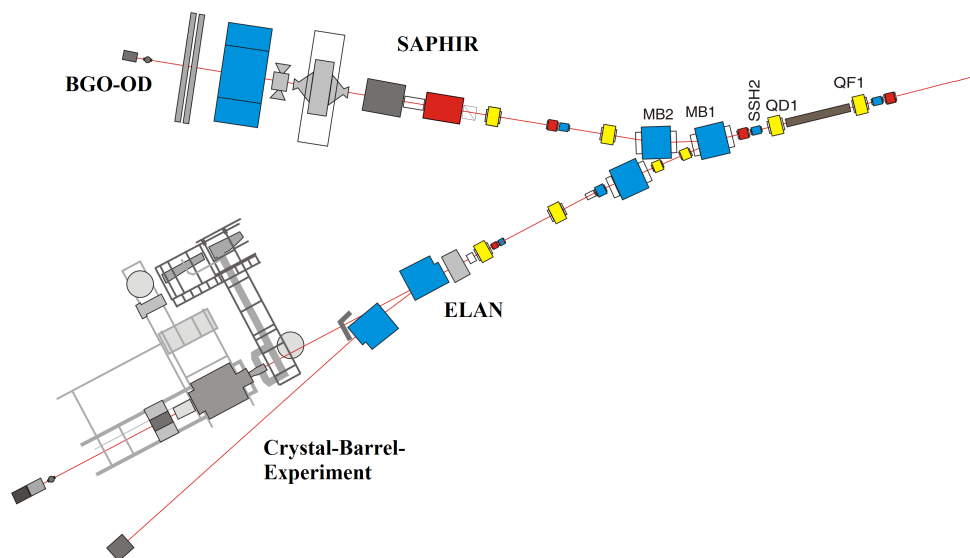


Abbildung 1.1: Übersicht zur externen Strahlführung von ELSA.

<sup>1</sup>Linear Accelerator

<sup>2</sup>Elektron-Streuung an Nucleonen

<sup>3</sup>Das Crystal-Barrel-Experiment untersucht die innere Struktur von Hadronen.

<sup>4</sup>Spectrometer Arrangement for Photon induced Reactions. Es ist zu bemerken, dass dieses Experiment nicht mehr existiert, sondern nur die Strahlführung weiterhin so benannt wird.

<sup>5</sup>BGO- open Dipol

In den Diplomarbeiten von Sven Zander [Zan08] und Stefan Patzelt [Pat09] wurden sowohl die vertikale, als auch die horizontale Emittanz in beiden Strahlführungen der Extraktion vermessen und in Abhängigkeit verschiedener Beschleunigergrößen untersucht. Bisher wurde die Veränderung unter den Parametern Extraktionsarbeitspunkt, Sextupolstärke sowie Position und Winkel der Septumsschneide genauer analysiert. Die Ergebnisse der vertikalen Emittanz entsprechen den theoretischen Erwartungswerten. Die Bestimmung der horizontalen Emittanz ist hingegen komplizierter, weil die in der Horizontalen vorhandene Dispersion (vgl. Kapitel 2.2) eine Vergrößerung der Strahlbreite zur Folge hat.

Da die Untersuchungen zur Dispersion und zur Emittanz in der Horizontalen noch nicht abgeschlossen sind, widmet sich diese Arbeit der Automatisierung der horizontalen Emittanzmessung in der SAPHIR-Strahlführung mit Hilfe des Programms *Matlab6*.

Die für die Bestimmung der Emittanz benötigten Werte der Strahlbreite und der Strahlablage wurden bisher so gemessen, indem einzelne Beschleunigerparameter im Kontrollsystem per Hand variiert wurden. Anschließend mussten die ermittelten Werte mit Hilfe von *Open-Office-Calc* und *Gnuplot* in einer sehr zeitaufwändigen Routine ausgewertet werden. Das Ziel dieser Arbeit ist eine Vereinfachung und Beschleunigung der Messroutine durch automatische Variation der Beschleunigerparameter und eine anschließende automatische Auswertung. Die erheblich kürzeren Durchführungszeiten ermöglichen Messungen mit kleineren Variationschritten, die im besten Fall zu eindeutigeren Ergebnissen führen können. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist eine bessere Fehlerabschätzung durch automatisch ausgelesene Strahlparameter.

Zur Auswertung wurden mit Hilfe des Programms *Matlab6* eine Dispensionsmessung am 27. April 2010, sowie zwei weitere Dispensionsmessungen und eine Emittanzmessung am 27. Mai 2010 durchgeführt.

## 2 Grundlagen der Strahldynamik und -parameter

### 2.1 Transversale Strahldynamik

Zur Beschreibung der Teilchenbahn wird ein mitbewegtes, rechthändiges Koordinatensystem  $K = (x, z, s)$  eingeführt. Ziel dieses Koordinatensystems ist es, die Darstellung der komplexen Bewegung der Teilchen im Laborsystem zu vereinfachen. Dazu verläuft der Koordinatenursprung stets entlang der Sollbahn. Teilchen, die sich auf der Sollbahn bewegen, sind der Idealfall und definieren eine geschlossene Bahn im Ringbeschleuniger.

Zum Verständnis von Kreisbeschleunigern muss man sich mit Strahloptik befassen. Wird ein Teilchen im Magnetfeld abgelenkt, so gilt stets, dass Lorentzkraft und Zentripetalkraft betragsmäßig gleich groß sind. Es ergibt sich eine Relation für den inversen Ablenkradius:

$$\frac{mv^2}{R} = evB \iff \frac{1}{R} = \frac{e}{p} B_z(x) \quad (2.1)$$

Führt man eine Multipolentwicklung von  $B_z(x)$  nach  $x$  durch, so erhält man folgende magnetische Multipolmomente, die den Strahl beeinflussen:<sup>6</sup>

Dipol	$\rightarrow \frac{1}{R} = \frac{e}{p} B_z(x)$	$\rightarrow$ Ablenkung
Quadrupol	$\rightarrow k = \frac{e}{p} \frac{dB_z}{dx}$	$\rightarrow$ Fokussierung
Sextupol	$\rightarrow m = \frac{e}{p} \frac{d^2 B_z}{dx^2}$	$\rightarrow$ Kompensation der Chromatizität

Beschränkt man sich auf konstante Magnetfelder der Ablenkmagnete und transversal linear anwachsende Felder der Quadrupole, spricht man von linearer Strahloptik. Man erhält in diesem Fall analytisch lösbare Gleichungen. Berücksichtigt man zusätzlich die Effekte der Sextupole, ist die analytische Lösbarkeit auf Grund der Nichtlinearität nicht mehr gegeben.

Die Hill'schen Differentialgleichungen bilden die fundamentale Grundlage zur Berechnung der linearen Strahloptik. Es handelt sich um die linearen Bewegungsgleichungen im mitbewegten System, welche ein über den Faktor  $k(s)$  gekoppeltes Differentialgleichungssystem bilden:

$$x''(s) + \left( \frac{1}{R^2(s)} - k(s) \right) x(s) = \frac{1}{R(s)} \frac{\Delta p}{p_0} \quad (2.2)$$

$$z''(s) + k(s)z(s) = 0 \quad (2.3)$$

Hierbei entspricht  $x''(s)$  der zweiten Ableitung von  $x$  nach  $s$ ,  $\Delta p = p - p_0$  der Impulsabweichung, sowie  $p_0$  dem Sollimpuls. Die Lösung besteht somit aus der Lösung der homogenen Differentialgleichung, die die Betatronschwingung (vgl. Kapitel 2.3) beschreibt, und der inhomogenen, die von der Impulsabweichung abhängt:

$$x(s) = x_\beta(s) + x_D(s) \quad (2.4)$$

In Kapitel 2.2 und 2.3 wird die Lösung detaillierter betrachtet.

---

<sup>6</sup>Hierbei wird die Multipolentwicklung nur für die horizontale Ebene betrachtet, da die Bauweise eines Beschleunigers meist planar ist.

## 2.2 Dispersion

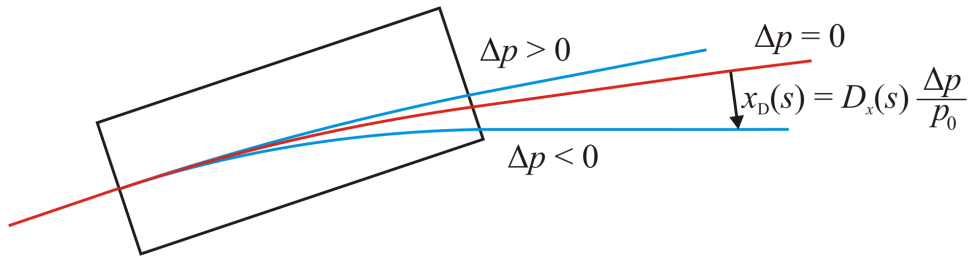


Abbildung 2.1: Dispersionsbahnen von Teilchen mit Impulsabweichung durch einen Dipolmagneten [Pat09].

Folgend soll durch Betrachtung der inhomogenen Lösung die Dispersion erläutert werden. Betrachtet man Teilchen mit einer Impulsabweichung  $\frac{\Delta p}{p_0} \neq 0$ , so hat dies nur Auswirkungen auf den Bahnverlauf, wenn zusätzlich  $\frac{1}{R} \neq 0$  ist. In erster Näherung tritt dies nur in Dipolen auf, weshalb hier ein homogenes Magnetfeld ohne Gradient angenommen werden kann ( $k = 0$ ). Die erste Hill'sche Differentialgleichung ergibt sich somit zu (vgl. Gleichung 2.2):

$$x''(s) + \frac{1}{R^2(s)} x(s) = \frac{1}{R(s)} \frac{\Delta p}{p_0} \quad . \quad (2.5)$$

In der Praxis ist eine Impulsabweichung vom Sollimpuls unvermeidlich, da die Teilchen Synchrotronschwingungen vollführen. Die Synchrotronschwingungen sind longitudinale Oszillation, die durch die Beschleunigung mit hochfrequenten Wechselfeldern zustande kommen. Löst man diese Gleichung beispielhaft für  $\frac{\Delta p}{p_0} = 1$ , so erhält man eine spezielle Lösung, die sogenannte Dispersionsbahn  $D(s)$ . Die Gesamtablage eines Teilchens mit der Impulsabweichung  $\frac{\Delta p}{p_0} \neq 0$  setzt sich aus einem durch die Impulsabweichung hervorgerufenen Term und einem Term, der die Ablage eines Teilchens mit Sollimpuls darstellt, zusammen. (vgl. Gleichung 2.4):

$$x(s) = x_\beta(s) + x_D(s) = x_\beta(s) + D(s) \frac{\Delta p}{p_0} \quad . \quad (2.6)$$

Anschaulich kann die Dispersion als das Maß für die Ablage von der Sollbahn eines Teilchens der Sollbahn mit einer bestimmten Impulsabweichung beschrieben werden.



### 2.3 Emittanz und Twissparameter

Mit Hilfe des in Kapitel 2.2 beschriebenen Formalismus kann die Dispersionsbahn einzelner Teilchen mit Impulsabweichungen berechnet werden. Ziel der Strahloptik ist es jedoch mit Hilfe der Twissparameter  $(\alpha, \beta, \gamma)$  die Eigenschaften des Strahls und somit des Kollektivs der Teilchen zu bestimmen.

Dazu werde angenommen, dass  $\frac{\Delta p}{p_0} = 0$  ist. Die Hill'sche Differentialgleichung wird zu einer homogenen Bewegungsgleichung (vgl. Gleichung 2.2):

$$x''(s) - k(s)x(s) = 0 \quad . \quad (2.7)$$

Die Bahnfunktion  $x_\beta(s)$  kann als Schwingung um die Sollbahn bezeichnet werden, deren Amplitude und Phase jedoch von der Position  $s$  abhängen. Diese Schwingung wird Betatronschwingung genannt. Die Lösung der Bahngleichung ist:

$$x_\beta(s) = \sqrt{\epsilon_x} \sqrt{\beta_x(s)} \cos[\Psi_x(s) + \phi_x] \quad . \quad (2.8)$$

Hierbei entspricht der Twissparameter  $\beta_x(s)$  der Amplitudenfunktion und wird auch Betafunktion genannt. Während die Betafunktion ein Maß für die Strahlbreite ist, stellt die Emittanz  $\epsilon$  den Amplitudenfaktor dar. Zusammen ergeben die Betafunktion und die Emittanz die einhüllende Enveloppe  $E_x(s) = \sqrt{\beta_x(s)\epsilon_x}$ .

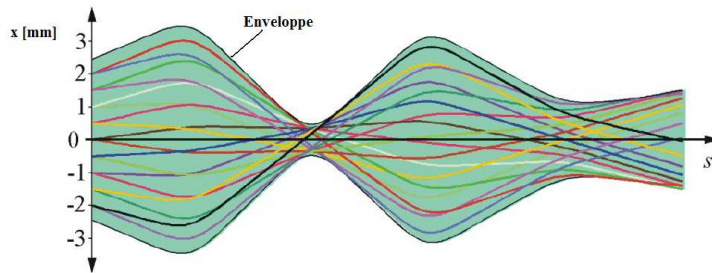


Abbildung 2.2: Teilchenverläufe innerhalb der einschließenden Enveloppe des Strahls [Hil/Mai09].

Der Twissparameter

$$\alpha(s) = -\frac{\beta'(s)}{2} \quad (2.9)$$

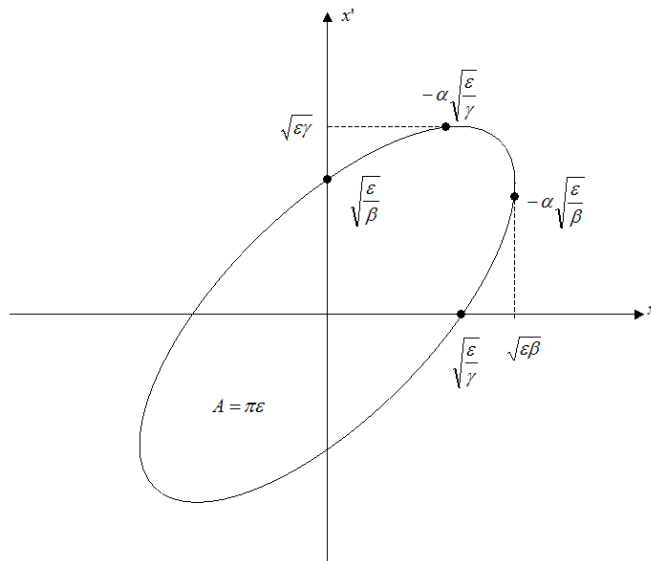
beschreibt die Korrelation zwischen  $x(s)$  und  $x'(s)$ . Es wird ein dritter Twissparameter

$$\gamma(s) := \frac{1 + \alpha(s)}{\beta(s)} \quad (2.10)$$

definiert, der die Divergenz normiert auf die Emittanz angibt.

Durch Einsetzen von  $x(s)$  (vgl. Gleichung 2.8) und deren Ableitung  $x'(s)$  ergibt sich folgende Ellipsengleichung:

$$\epsilon_x = \gamma_x(s)x^2(s) + 2\alpha_x(s)x(s)x'(s) + \beta_x(s)x'^2(s) \quad (2.11)$$

Abbildung 2.3: Teilchenbewegung im  $x$ - $x'$ -Phasenraum.

Trägt man  $x(s)$  und  $x'(s)$  gegeneinander auf, erhält man eine Ellipse im sogenannten Phasenraum. Da hier nur die horizontale Komponente betrachtet wird, erhält man einen zweidimensionalen Graph. Ein Teilchen startet an einer bestimmten Stelle  $s$  im Beschleuniger mit den Koordinaten  $(x_0, x'_0)$ , nach einmaligem Durchlaufen des Beschleunigers befindet es sich erneut an der Stelle  $s$  mit den Koordinaten  $(x_1, x'_1)$ . Jeder weitere Umlauf ergibt einen weiteren Bahnvektor an der Stelle  $s$ . Die durch die im Phasenraum aufgetragenen Bahnvektoren dargestellte Ellipse lässt sich als Bild des Phasenraums an der Stelle  $s$  verstehen. Die Emittanz ist ein Maß für die Fläche der Ellipse. Es gilt:  $A = \pi\epsilon$ . Nach dem Satz von Liouville<sup>7</sup> ist die Phasenraumfläche eine Erhaltungsgröße, wenn nur die Einflüsse von Dipolen und Quadrupolen beachtet werden. Bei der Betrachtung eines Elektronenbeschleunigers kann das Strahlprofil durch eine Gaussverteilung angenähert werden. Dabei ist die Strahlbreite  $\sigma(s)$  als der Abstand von der Strahlachse, bei dem die Ladungsdichte auf  $e^{-\frac{1}{2}} = 0.607$  abgefallen ist, definiert. Die Emittanz kann durch  $\sigma(s) = \sqrt{\beta(s)\epsilon}$  der Strahlbreite zugeordnet werden. Die gesamte Strahlbreite enthält weiterhin einen dispersiven Anteil. Sie steht wie folgend in Beziehung mit den oben diskutierten Größen Dispersion und Emittanz:

$$\sigma(s) = \sqrt{\sigma_{\text{Emittanz}}(s)^2 + \sigma_{\text{Dispersion}}(s)^2} = \sqrt{\beta(s)\epsilon + \left(D(s)\frac{\Delta p}{p_0}\right)^2} \quad . \quad (2.12)$$

<sup>7</sup>Der Satz von Liouville besagt, dass in konservativen Systemen das von benachbarte Trajektorien im Phasenraum eingeschlossene Volumen konstant ist.

### 3 Resonanzextraktion

Zur Extraktion aus ELSA wird eine drittelzahlige, nichtlineare Resonanz mit Hilfe von Sextupolen angeregt. In Kapitel 2.3 wurde die auf linearer Strahloptik basierende Phasenraumellipse vorgestellt. Da die lineare Strahloptik auf konstanten Magnetfeldern der Ablenkmagnete und transversal linear anwachsenden Feldern der Quadrupole beruht, ist diese durch Hinzufügen der Sextupole nicht mehr gültig. Aus diesem Grund erhält man im Phasenraum keine Ellipse, sondern eine dreieckige Separatrix, wobei die dreieckige Form durch die Drittelzahligkeit der Resonanz verursacht wird. Durch die Separatrix wird der Phasenraum in einen stabilen und einen instabilen Bereich aufgeteilt. Dem stabilen Bereich entspricht die Fläche innerhalb des Dreiecks, dem instabilen Bereich hingegen die Äste und die Fläche außerhalb der Separatrix. Zur Extraktion werden die Elektronen auf die Äste verschoben, so dass ihre Bewegung instabil wird und sie mit Hilfe der Septumsschneide extrahiert werden können. Dabei entfernen sie sich mit jedem weiteren Umlauf vom stabilen Bereich, bis sie die Septumsschneide überschritten haben (vgl. Abbildung 3.1). Mit Hilfe von Luftquadrupolen wird der horizontale Arbeitspunkt zum resonanten Arbeitspunkt hinverschoben, sodass sich die Fläche der Separatrix verkleinert und die Teilchen in den instabilen Bereich gelangen.

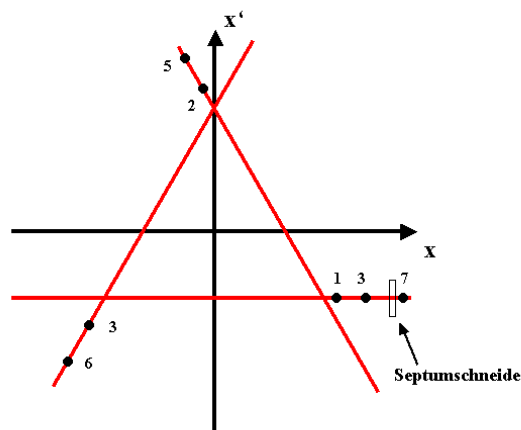


Abbildung 3.1: Bewegung auf den instabilen Separatrixästen. Die Zahlen stehen für den  $n$ -ten Umlauf im Beschleuniger.

Hinter der Septumsschneide definiert der Verlauf des Separatrixastes eine Fläche, die die neue Emittanz bestimmt. Diese Fläche ist nicht ellipsoid. Es wird jedoch angenommen, dass sich der Strahl durch die bis zur Messung durchlaufenen Magnete so verändert, dass die Phasenraumfläche wieder einer Ellipse entspricht. Auf Grund dieser ungewissen Annahme ist der verwendete Formalismus zur Bestimmung der Emittanz (vgl. Kapitel 5) nur bedingt gültig. Aus demselben Grund kann das Strahlprofil von einem gaußförmigen Strahlprofil abweichen, das zur Vermessung der Strahlablage und -breite verwendet wird.

Vertikal erwartet man die selben Emittanzwerte wie in ELSA, da es keine Verschiebung des Arbeitspunktes gibt. Die natürliche horizontale Emittanz in ELSA, die durch den Gleichgewichtszustand von Energiezufuhr und Synchrotronabstrahlung bestimmt ist, beträgt etwa 480 nm rad bei einer Energie von 2 GeV. Durch geschicktes Einstellen der gegebenen Parameter soll ein besserer Wert für die Emittanz in der externen Strahlführung erreicht werden.

## 4 Matrixformalismus

In den folgenden Kapiteln werden die Transfermatrizen der unterschiedlichen Beschleunigerelemente vorgestellt und die Transformation der Twissparameter erläutert.

### 4.1 Transformationsmatrizen

Da es bei Dipol- und Quadrupolmagneten für eine ideale Maschine keine Kopplung zwischen der horizontalen und der vertikalen Teilchenbewegung gibt, wird hier der Matrixformalismus nur für die x-s-Ebene betrachtet. Man nimmt an, dass  $x_0$  und  $x'_0$  den Startkoordinaten entsprechen, mit denen das Teilchen in ein Element des Beschleunigers einläuft. Mit Hilfe der Transfermatrix  $M$  erhält man den Bahnvektor  $(x(s), x'(s))$ .

$$\begin{pmatrix} x(s) \\ x'(s) \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Die Transfermatrix erhält für unterschiedliche Elemente verschiedene Einträge, die im Folgenden aufgeführt werden:

**Driftstrecke:** Für eine Driftstrecke der Länge  $s$  sind  $\frac{1}{R} = 0$  und  $k = 0$ , daher wird der Strahl weder abgelenkt noch fokussiert.

$$M_{\text{Drift}} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

**Quadrupol:** Quadrupole mit der Länge  $l$ ,  $R = 0$  und  $k \neq 0$  wirken in der einen transversalen Ebene fokussierend und in der anderen defokussierend. Zur Vereinfachung der Notation wird  $\Omega = \sqrt{|k|l}$  definiert. Man unterscheidet:

**Horizontal fokussierend:**

$$M_{\text{Fok}} = \begin{pmatrix} \cos(\Omega) & \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \sin(\Omega) \\ -\sqrt{k} \sin \cdot (\Omega) & \cos(\Omega) \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

**Horizontal defokussierend:**

$$M_{\text{Defok}} = \begin{pmatrix} \cosh(\Omega) & \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \sinh(\Omega) \\ \sqrt{k} \cdot \sinh(\Omega) & \cosh(\Omega) \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

**Dipol:** Dipole mit der Länge  $s$ ,  $k = 0$  und  $R \neq 0$  lenken den Strahl in der horizontalen Ebene um den Winkel  $\varphi = \frac{s}{R}$  ab.

$$M_{\text{Dipol}} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & R \cdot \sin(\varphi) \\ -\frac{1}{R} \cdot \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

**Kantenfokussierung:** Wenn der Teilchenstrahl nicht senkrecht in den Dipol eintritt oder aus dem Dipol austritt, so wird dieser vertikal fokussiert und horizontal defokussiert. Definiert man  $\Psi$  als Ein-/Austrittswinkel, so erhält man:

$$M_{\text{Kante}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{R} \cdot \tan(\Psi) & 1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Um die Transfermatrix für eine komplexere Struktur, zusammengesetzt aus den oben genannten Elementen, zu bestimmen, werden die Transfermatrizen der einzelnen Elemente mit Hilfe der Matrixmultiplikation verknüpft (vgl. Kapitel 5.2):

$$M_{\text{gesamt}} = M_n \cdot M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1 \quad (4.7)$$

## 4.2 Transformation der Twissparameter

Man kann durch den oben beschriebenen Matrixformalismus auch die Twissparameter an beliebigen Orten berechnen. Dazu repräsentieren  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  und  $\gamma_0$  die optischen Funktionen am Startpunkt, sowie  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  nach der Transformation. In der zur Emittanzmessung verwendete Methode des Quadrupolscans zur Emittanzmessung wird die folgend dargestellte Transformation der Twissparameter benötigt. Mit der Definition der Phasenellipse gilt:

$$\epsilon_x = \beta_x x'^2 + 2\alpha_x x x' + \gamma_x x^2 \quad . \quad (4.8)$$

Aufgrund des Satzes von Liouville ist die Fläche im Phasenraum konstant und somit auch die Emittanz. Es ergibt sich leicht:

$$\epsilon = \beta x'^2 + 2\alpha x x' + \gamma x^2 = \beta_0 x_0'^2 + 2\alpha_0 x_0 x_0' + \gamma_0 x_0^2 \quad . \quad (4.9)$$

Durch Ersetzen von  $x_0 = m_{22}x - m_{12}x'$  und  $x_0' = -m_{21}x + m_{11}x'$  erhält man:

$$\begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}^2 & -2m_{11}m_{12} & m_{12}^2 \\ -m_{11}m_{21} & m_{11}m_{22} + m_{12}m_{21} & -m_{22}m_{12} \\ m_{21}^2 & -2m_{22}m_{21} & m_{22}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \alpha_0 \\ \gamma_0 \end{pmatrix} \quad . \quad (4.10)$$

## 5 Verfahren zur Emittanzmessung

Wie in vorangegangenen Kapiteln deutlich wurde, wird die Emittanz durch die Größen  $x$  und  $x'$  definiert. Insbesondere  $x'$  ist jedoch nicht direkt messbar. Mit Hilfe eines Synchrotronlichtmonitors können die Größen der Strahlablage und -breite vermessen werden, wodurch die Emittanz mit Hilfe des auf genannten Größen basierenden Quadrupolscans bestimmt wird. Weiterhin ist für diesen Formalismus eine Transformation der Bahnvektoren von Nöten. In folgenden Kapiteln wird der Quadrupolscan, zugehörige Messungen und Berechnungen detaillierter beschrieben.

### 5.1 Quadrupolscan

Die Emittanzmessung erfolgt durch die Methode des Quadrupolscans, die auf einfachen strahl-optischen Berechnungen basiert. Während in diskreten Schritten die Quadrupolstärke verändert wird, wird mit Hilfe eines Synchrotronlichtmonitors ein Strahlprofil aufgenommen und der Einfluss auf die Strahlbreite untersucht. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 5.1 gezeigt.

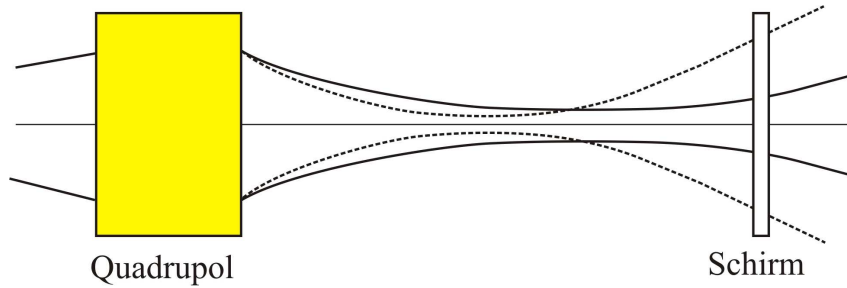


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau eines Quadrupolscans [Pat09].

Der Monitor zeichnet die gesamte Strahlbreite auf, die sich aus einem dispersiven und einem emittanzdominierten Anteil zusammensetzt. Da die Emittanz bestimmt werden soll, muss der disperse Anteil herausgerechnet werden. Zur Bestimmung der Dispersion wird vor der Messung der Strahlbreite eine Dispersionsmessung durchgeführt (vgl. Kapitel 5.3).

Aus dem Matrixformalismus geht hervor, dass die Betafunktion am Ort des Monitors über folgende Gleichung von jener im Quadrupol abhängt:

$$\beta(s, k) = m_{11}^2(s, k)\beta_0 - 2m_{11}(s, k)m_{12}(s, k)\alpha_0 + m_{12}(s, k)^2\gamma_0 \quad . \quad (5.1)$$

Da die bereinigte Strahlbreite  $\sigma(s) = \sigma_{\text{Emittanz}}(s) = \sqrt{\beta\epsilon}$  entspricht, multipliziert man Gleichung 5.1 mit  $\epsilon$  und erhält:

$$\sigma_{\text{Emittanz}}^2(k) = m_{11}^2(k)[\beta_0\epsilon] - 2m_{11}(k)m_{12}(k)[\alpha_0\epsilon] + m_{12}(k)^2[\gamma_0\epsilon] \quad . \quad (5.2)$$

Durch einen Fit können die drei Parameter  $[\alpha_0\epsilon]$ ,  $[\beta_0\epsilon]$  und  $[\gamma_0\epsilon]$  bestimmt werden. Um die Emittanz aus den genannten Parametern zu berechnen, muss das Minimum des Fits, das der Strahltaile entspricht, bestimmt werden. Für den Ort der Strahltaile lässt sich der Twissparameter  $\gamma$  zu

$$\gamma_t = \frac{1}{\beta_t} \quad (5.3)$$

vereinfachen (vgl. Gleichung 2.9 und 2.10), da der Twissparameter  $\alpha$  dort Null ist.

Die Transformation der Gammafunktion wird in Kapitel 4.2 beschrieben.

$$\gamma(s, k) = m_{21}^2(s, k)\beta_0 - 2m_{21}(s, k)m_{22}(s, k)\alpha_0 + m_{22}^2(s, k)\gamma_0 \quad . \quad (5.4)$$

Durch erneutes Erweitern der Gleichung 5.4 mit  $\epsilon$ , erhält man die Gleichung:

$$\epsilon^2 = \sigma_t^2 [m_{21}^2(k_t)\beta_0\epsilon - 2m_{21}(k_t)m_{22}(k_t)\alpha_0\epsilon + m_{22}^2(k_t)\gamma_0\epsilon] \quad . \quad (5.5)$$

Die Emittanz  $\epsilon$  kann nun bestimmt werden.

In den folgenden Kapiteln werden anhand von Beispielen die Bestimmung der Transfermatrix, sowie die Messungen und Berechnungen zur Dispersion und Emittanz exemplarisch aufgeführt.

## 5.2 Matrizenoptik in der Extraktion

Die Parameter der Elemente MB2, MB1, SSH2, sowie QD1 werden zu Beginn einer Messung im Menu des Kontrollsystems aufgerufen. Im Gegensatz zur variierenden Quadrupolstärke des QF1 verändern sie sich während der gesamten Messung nicht. Aus diesem Grund kann die Transfermatrix <sup>8</sup> bis auf den letzten Faktor  $M_{QF1}$  berechnet werden.

Man erhält:

Elektronenenergie	$E = 2 \text{ GeV}$
Einstellungen des Ablenkmagneten MB1	$\varphi_{MB1} = 134.5561 \text{ mrad} \leftrightarrow R_{MB1} = 8.05 \text{ m}$
Einstellungen des Ablenkmagneten MB2	$\varphi_{MB2} = 134.8154 \text{ mrad} \leftrightarrow R_{MB2} = 8.04 \text{ m}$
Einstellungen des Korrekturmagneten SSH2	$\varphi_{SSH2} = 0.004 \text{ mrad} \leftrightarrow R_{SSH2} = 84720.12 \text{ m}$
Stärke des Quadrupolmagneten QD1	$k_{QD1} = 0.46 \text{ m}^{-2}$

Tabelle 5.1: Eingestellte Parameter in der externen Strahlführung.

$$M_{\text{gesamt}} = \begin{pmatrix} 1.20 \cdot \cos(\Omega_{QF1}) & 1.20 \cdot \frac{1}{\sqrt{k_{QF1}}} \cdot \sin(\Omega_{QF1}) \\ -4.53 \cdot \sqrt{k_{QF1}} \cdot \sin(\Omega_{QF1}) & +4.53 \cdot \cos(\Omega_{QF1}) \\ 0.23 \cdot \cos(\Omega_{QF1}) & 0.23 \cdot \frac{1}{\sqrt{k_{QF1}}} \cdot \sin(\Omega_{QF1}) \\ -1.70 \cdot \sqrt{k_{QF1}} \cdot \sin(\Omega_{QF1}) & +1.70 \cdot \cos(\Omega_{QF1}) \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Die Elemente der Matrizen werden folgend zur Vereinfachung mit

$$M_{\text{gesamt}} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m'_{11} & m'_{12} \\ m'_{21} & m'_{22} \end{pmatrix} \cdot M_{QF1} \quad (5.7)$$

bezeichnet.

<sup>8</sup> $M_{\text{gesamt}} = M_{MB2} \cdot M_{\text{Drift}} \cdot M_{\text{KanteMB1}} \cdot M_{MB1} \cdot M_{\text{Drift}} \cdot M_{\text{KanteSSH2}} \cdot M_{SSH2} \cdot M_{\text{Drift}} \cdot M_{QD1} \cdot M_{\text{Drift}} \cdot M_{QF1}$

### 5.3 Dispersionsmessung

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, führt die Dispersionsfunktion  $D(s)$  dazu, dass sich die Teilchen auf von der Sollbahn abweichenden Bahnen bewegen. Unterschiedliche Bahnen im Beschleuniger führen zu einer Abweichung der Bahnlänge  $\Delta L$ . Mit Hilfe des Momentum-Compaction-Faktors  $\alpha = \frac{\Delta L/L}{\Delta p/p}$  kann eine Relation zwischen Impulsabweichung und Längenabweichung hergestellt werden. Da die Bahnlänge ein Vielfaches der Wellenlänge der Hochfrequenz ist, kann deshalb zusätzlich  $\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta\nu_{\text{HF}}}{\nu_{\text{HF}}}$  ersetzt werden und man erhält für die Ablage des Teilchenensembles von der Sollbahn:

$$x_D(s) = -\frac{D_x(s)}{\alpha} \frac{\Delta\nu_{\text{HF}}}{\nu_{\text{HF}}} \quad (5.8)$$

So kann durch Veränderung der Hochfrequenz die Dispersion mit Hilfe der jeweiligen Strahlablage bestimmt werden. Dazu wird die gemessene Ablage gegen die Frequenzverschiebung aufgetragen.

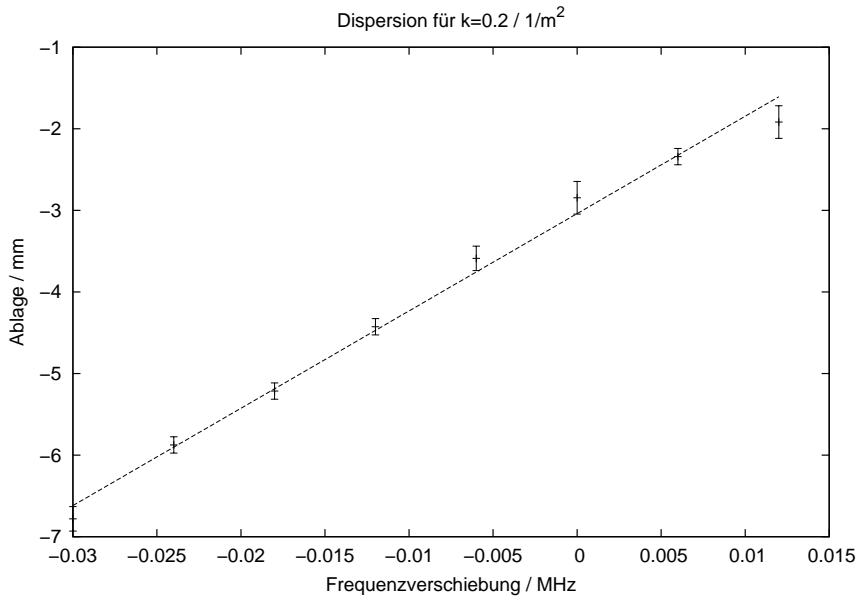


Abbildung 5.2: Geradenfit zur Bestimmung der Dispersion bei der Quadrupolstärke  $k = 0.2 \text{ m}^{-2}$ .

Man erhält für die in Abbildung 5.2 aufgetragenen Daten mit Hilfe der Steigung der Geraden eine Dispersion von  $D(s) = (7.6049 \pm 0.4586) \text{ m}$ . Die verwendeten Daten befinden sich im Anhang in Tabelle B.1. Diese Dispersion ist abhängig von der eingestellten Quadrupolstärke. Ziel ist es jedoch den Wert der Dispersionsfunktion zu erhalten, mit der die Dispersion für die gegebenen Beschleunigerparameter und jede beliebige Quadrupolstärke berechnet werden kann. Folglich wird zur vollständigen Beschreibung der Dispersion weiterhin die Änderung der Dispersion benötigt. Dazu wird die beschriebene Messung für unterschiedliche Quadrupolstärken durchgeführt und jeweils eine zugehörige Dispersion bestimmt. Anschließend werden die ermittelten Dispersionswerte gegen die Quadrupolstärke aufgetragen und durch die Funktion

$$D(k) = m_{11}(k)D_0 + m_{12}(k)D'_0 \quad (5.9)$$



angefittet. Für die durchgeführte Messung ergibt sich für gegebene Beschleunigerparameter  $m'_{11} = 1.3474$  und  $m'_{12} = 5.6551$ .

$$D(s) = \left( 1.3474 \cdot \cos(\Omega) - 5.6551 \cdot \sqrt{k} \cdot \sin(\Omega) \right) D_0 + \left( 1.3474 \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \sin(\Omega) - 5.6551 \cdot \cos(\Omega) \right) D'_0 \quad (5.10)$$

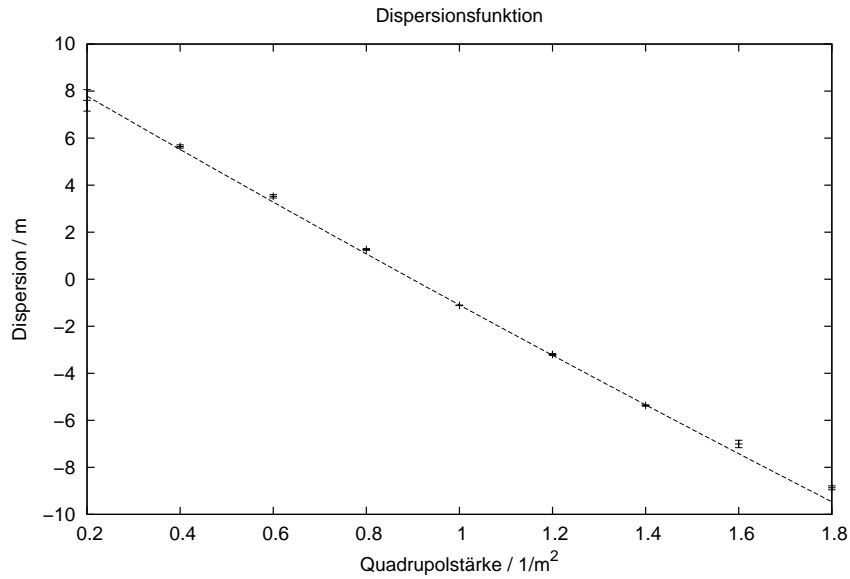


Abbildung 5.3: Fit zur Bestimmung der Dispersionsfunktion.

Die Werte für die Dispersionsfunktion und deren Änderung ergeben sich zu:

$$D_0 = (3.9073 \pm 0.0641) \text{ m} \quad (5.11)$$

$$D'_0 = 0.7664 \pm 0.0169 \quad . \quad (5.12)$$

### 5.4 Emittanzmessung

Für die Messung der Emittanz wird wie in Kapitel 5.1 beschrieben die Quadrupolstärke variiert und die zugehörige Strahlbreite vermessen. Die Strahlbreite (vgl. Gleichung 2.12) wird anschließend vom dispersiven Anteil befreit und gegen die Quadrupolstärke aufgetragen. Die verwendeten Daten befinden sich im Anhang in Tabelle B.2. Man erhält folgenden Plot:

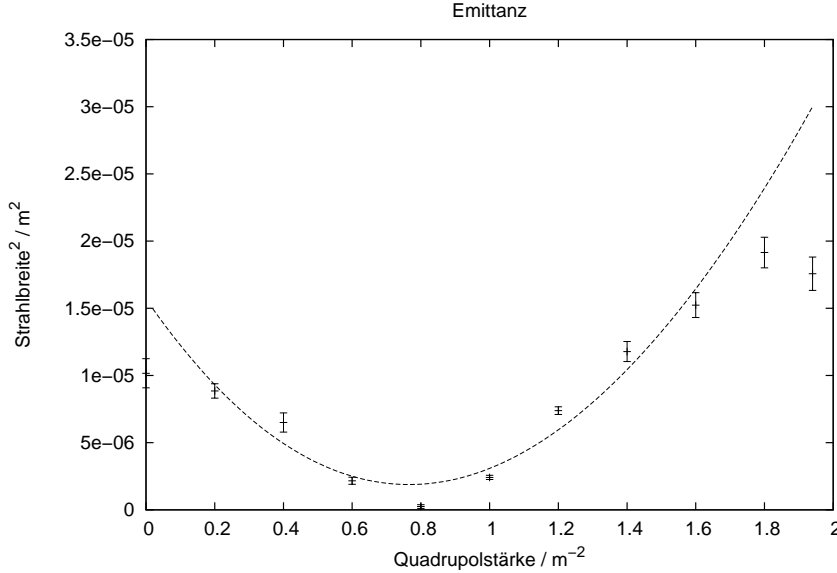


Abbildung 5.4: Fit zur Bestimmung der Emittanz.

Die in Abbildung 5.4 aufgetragene Gleichung entspricht der in Kapitel 5.1 hergeleiteten Gleichung 5.2. Die drei Fitparameter ergeben sich zu:

$$[\alpha_0\epsilon] = (-3.47 \pm 0.77) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ rad} ,$$

$$[\beta_0\epsilon] = (2.76 \pm 0.36) \cdot 10^{-6} \text{ m rad} ,$$

$$[\gamma_0\epsilon] = (9.65 \pm 1.93) \cdot 10^{-8} \text{ rad} .$$

Zur Bestimmung der Emittanz ist weiterhin die Quadrupolstärke in der Strahlteile von Nöten. Es ergibt sich  $k_t = 0.76 \text{ m}^{-2}$  bei einer Strahlbreite von  $\sigma_t = 9.09 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ . Durch Einsetzen der ermittelten Twissparameter, der Quadrupolstärke der Strahlteile, sowie der Strahlbreite in der Taille, lässt sich die Emittanz mit Gleichung 5.5 zu:

$$\epsilon = (476.02 \pm 130.23) \text{ nmrad} \tag{5.13}$$

berechnen. Die erhaltene Emittanz liegt in der Größenordnung der natürlichen Emittanz von ELSA.

## 6 Programmbeschreibung

In diesem Kapitel werden nach einer kurzen einleitenden Erläuterung über die Symbolik der Flussdiagramme, die zur Beschreibung der Programme dienen, die Vorgehensweise der Programme erklärt.

### 6.1 Anmerkungen zum Flussdiagramm

Um die grobe Struktur einfacher und anschaulicher wiederzugeben, sind die Flussdiagramme in einigen Schritten vereinfacht. Die einzelnen Schritte werden jedoch in den folgenden Kapiteln detaillierter erläutert.

Hier sollen kurz die verwendeten Symbole des Flussdiagramms erklärt werden:

→  Rot unterlegte Ovale

stellen den Start und das Ende des Programms dar.

→  Weiß unterlegte Rechtecke

stellen entweder einen Schnittpunkt mit dem Kontrollsystem dar, an denen Daten ausgelesen oder eingegeben werden, oder symbolisieren eine manuelle Eingabe des Bedieners.

→  Blau unterlegte Rechtecke

stellen interne Rechenoperationen oder Ausgaben des Programms dar.

→  Gelb unterlegte Rauten

stellen Abfragen in Form einer Schleife oder manuellen Eingabe dar. Es gibt jeweils zwei von der Antwort abhängige Wege, die weiterverfolgt werden können.

### 6.2 Programmbedienung

Die Programme zur Dispersions- und Emittanzmessung müssen durch eine Konsole geöffnet und gesteuert werden. Mit Hilfe des Pfads

```
'/sgt/elsa/matlab/emittanz_extr'
```

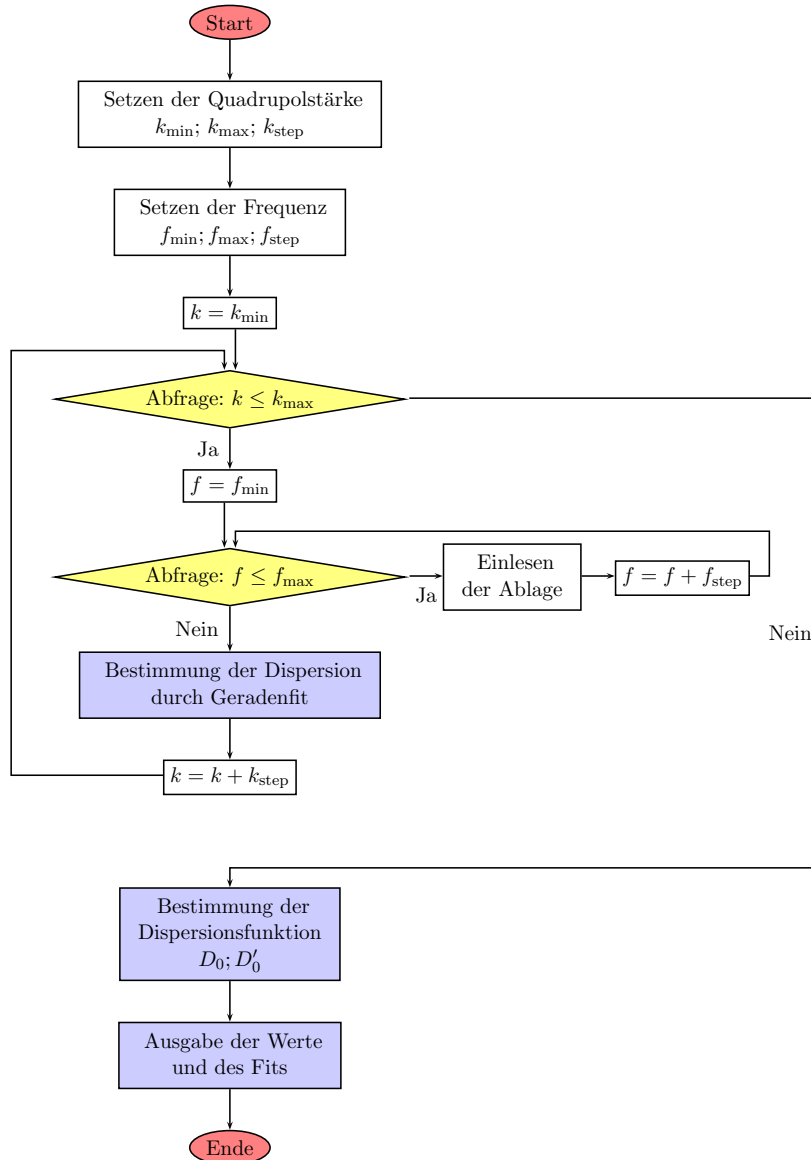
gelangt man in den Ordner, indem die Programme zur Dispersionsmessung und zur Emittanzmessung gespeichert sind. Er enthält zwei weitere selbsterklärende Unterordner mit Namen:

```
'Dispersion' und 'Emittanz'.
```

Mit dem Befehl `'matlab6'` wird *Matlab6* in der Konsole innerhalb des gewählten Ordners geöffnet. Durch Eingabe des Programmnamen `'Dispersionsmessung'` bzw. `'Emittanzmessung'` kann das Programm geöffnet werden. Alle weiteren Eingaben werden durch Erklärungen und Aufforderungen des Programm begleitet.

Wie in den Kapiteln 6.3 und 6.4 beschrieben wird, werden die Ausgaben unter gewünschten Namen abgespeichert. Der Benutzer trägt dabei selbst die Verantwortung, dass durch seine Namensgebung keine vorhandenen Dateien überschrieben werden. Die gespeicherten Graphiken und Datentabellen werden in einem weiteren Unterordner namens `'Werte'` der Ordner `'Dispersion'` und `'Emittanz'` gespeichert. Alle weiteren Dokumente, die sich in diesen Ordnern befinden, sind Unterdateien des Programms oder Zwischenspeicher.

### 6.3 Programm zur Dispersionsmessung



Ziel des Programms ist die Dispersionsfunktion für gegebene Parameter des Beschleunigers zu bestimmen um anschließend die Dispersion für beliebige Quadrupolstärken des QF1 zu berechnen. Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, wird die Dispersion zur Bestimmung der Emittanz benötigt. Zu Beginn des Programms wird der Bereich der Quadrupolstärken erfragt, in dem gemessen werden soll. Dazu wird eine Eingabe der kleinsten und der größten einzustellenden Quadrupolstärke und die Schrittweite erwartet, mit der die Quadrupolstärke variiert wird. Zusätzlich beinhaltet das Programm zwei Sicherheitsabfragen, damit durch fehlerhafte Eingaben kein Abbruch des Programms auftritt. Während die erste prüft, ob die eingegebene kleinste Quadrupolstärke wirklich kleiner als der Wert der größten Quadrupolstärke ist, testet die zweite ob die Schrittweite ungleich Null ist. Entsprechend zu dieser Eingaberoutine der Quadrupolstärke wird eine Eingabe der Frequenzen durchgeführt.

Es folgt die Übergabe der Quadrupolstärken an das Kontrollsystem mit Hilfe einer Schleife. Dazu wird mit der kleinsten Quadrupolstärke begonnen, die in jedem Schleifendurchlauf schritt-

weise vergrößert wird. Da im Kontrollsystem der Wert der Quadrupolstärke über den Strom variiert wird, muss die gegebene Quadrupolstärke vorerst in einen Strom umgerechnet werden (vgl. [Wil96] Kapitel 3.3.2).

Anschließend startet eine weitere Schleife innerhalb der ersten Schleife. Die innere Schleife variiert nun nach demselben Prinzip die Frequenz. Weiterhin wird in dieser Schleife die Ablage des Strahlschwerpunktes von der Sollbahn bei der jeweiligen Frequenz und Quadrupolstärke ausgelesen. Dazu wird über vier Zyklen der Wert der Ablage vom Kontrollsystem an das Programm übergeben. Das Programm mittelt über diese vier Werte und setzt die Standardabweichung der Mittelung als Fehler für die Ablage fest. Anschließend werden die ermittelten Daten in eine Matrix geschrieben, um später mit diesen weiter arbeiten zu können.

Das Programm springt nun zum Anfang der inneren Schleife und variiert die Frequenz, indem die Schrittweite zum bestehenden Frequenzwert hinzuaddiert wird. Der oben beschriebene Verlauf der Schleife wiederholt sich, bis die Frequenz ihr Maximum erreicht hat.

Dort angekommen geht das Programm in die Berechnung eines Geradenfits über. Da das Programm sich weiterhin im ersten Durchlauf der äußeren Schleife befindet ist die Quadrupolstärke noch immer minimal. Es wird somit bei konstanter Quadrupolstärke die vermessene Ablage gegen die Frequenz betrachtet.

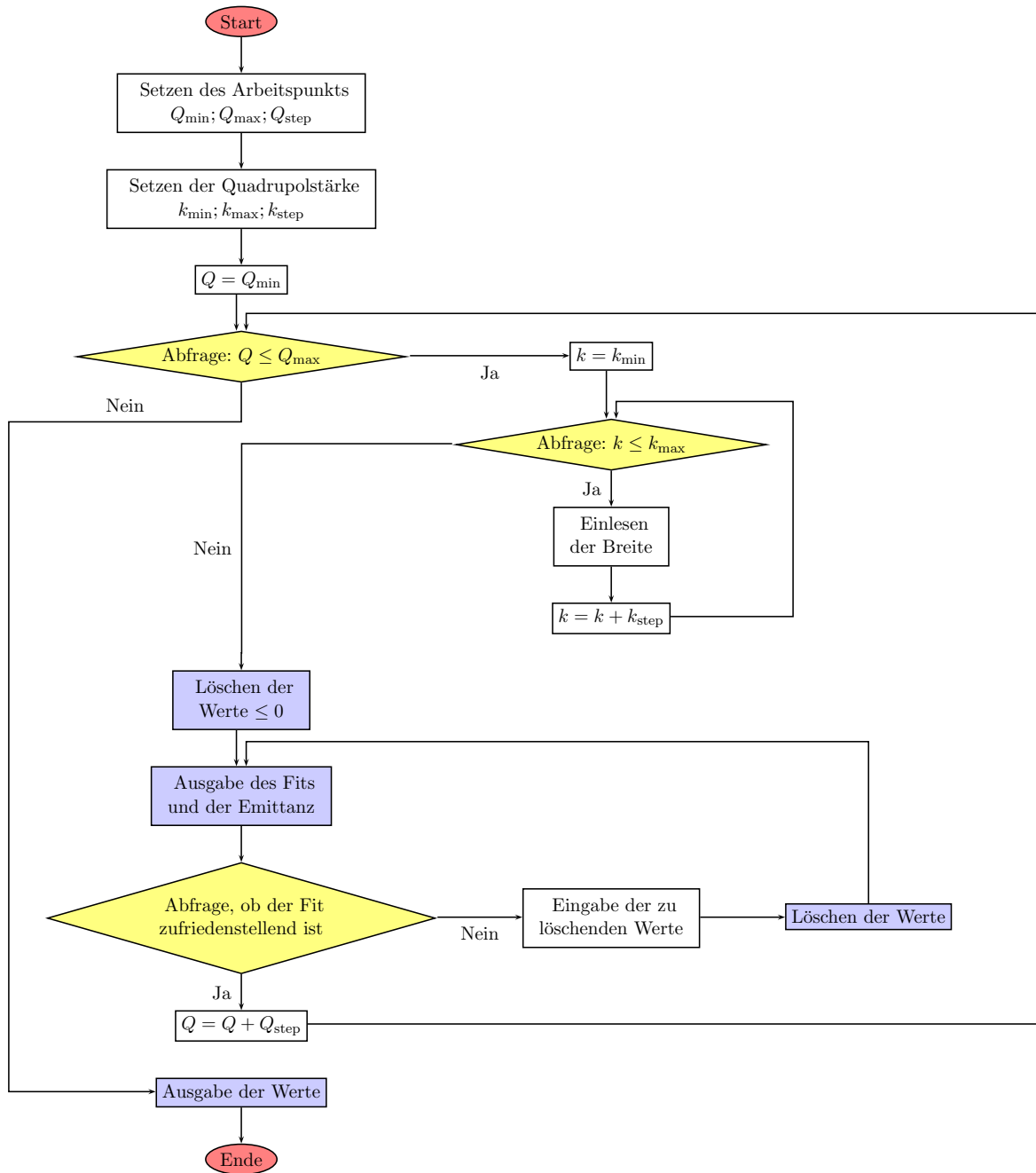
Im weiteren Verlauf werden neben Geradenfits komplexere Funktionen an die gegebenen Daten angefügt. Es ist möglich mit *Matlab6* diese Funktionen anzufügen, jedoch können weder die Fehler der Daten berücksichtigt werden, noch kann ein Fehler zu den zu bestimmenden Parametern ausgegeben werden. Für die Messung der Emittanz ist eine Fehlerrechnung sehr wichtig und kann auf keinen Fall vernachlässigt werden. Aus diesem Grund wird der umständlichere Weg über *Gnuplot* gewählt.

Zur Bestimmung des Fits in *Gnuplot*, muss dieses innerhalb von *Matlab6* geöffnet und benötigte Daten übergeben werden. Dazu werden die in oben schon erwähnte Matrix geschriebenen Werte in einer *txt*-Datei außerhalb des Programms gespeichert. Diese Datei wird anschließend im Gnuplotscript, welches ebenfalls in *Matlab6* erstellt wird, aufgerufen. Nach Berechnung der Fitparameter werden diese ebenfalls durch eine *txt*-Datei gespeichert und in *Matlab6* geladen. So erhält man die Dispersion und deren Fehler zur eingestellten Quadrupolstärke. Eine weitere Matrix wird mit diesen Informationen befüllt.

Das Programm ist nun am Ende der äußeren Schleife angelangt und setzt die Quadrupolstärke um die eingegebene Schrittweite hoch. Wie in der Schleife zur Frequenzvariation beschrieben, läuft auch diese Schleife so oft durch, bis der Maximalwert erreicht ist. Anschließend soll nun aus den einzelnen bestimmten Dispersionen eine Dispersionsfunktion errechnet werden.

Dazu werden die Transformationsmatrizen der Strahlführung multipliziert. Das Programm liest die benötigten Parameter wie die Winkel der Ablenkmagnete und Korrekturmagnete, sowie die Quadrupolstärke des QD1 aus dem Kontrollsystem aus. Die so ermittelten Matrixeinträge werden für den Fit der Dispersionsfunktion benötigt. Wie für den Geradenfit der Dispersionsberechnung erläuterten Methode wird auch dieser Fit auf die selbe Weise in *Gnuplot* durchgeführt. Zum Schluss des Programms wird ein Graph erstellt, der sowohl die Daten inklusive ihrer Fehler, als auch den zugehörigen Fit beinhaltet. Weiterhin werden dort die Dispersionsfunktion und die zugehörigen Fehler ausgegeben. Diese Graphik kann anschließend unter gewünschten Namen abgespeichert werden. Damit die berechneten Werte nachvollzogen werden können, wird zusätzlich eine *txt*-Datei ausgegeben, die alle aufgenommenen Daten der Strahlablage, sowie Einstellungen des Beschleunigers beinhaltet.

## 6.4 Programm zur Emittanzmessung



Ziel des Programms ist die Bestimmung der Emittanz für unterschiedliche Extraktionsarbeitspunkte oder Sextupolstärken. Der Verlauf des Programms basiert dabei auf der Methode des Quadrupolscans (vgl. Kapitel 5.1). Zu Beginn des Programms müssen einige Größen eingelesen und berechnet werden. Dazu wird wie im Programm der Dispensionsmessung die Matricelemente der Transfermatrizen berechnet. Weiterhin müssen die aus der Dispensionsmessung erhaltenen Werte für die Dispersionsfunktion und deren Änderung, jeweils inklusive Fehler manuell eingegeben werden.

Im nächsten Schritt muss der Benutzer entscheiden, ob er den Extraktionsarbeitspunkt oder die Sextupolstärke verändern möchte. Diese Unterscheidung wird im Programm durch eine Case-

Abfrage realisiert. Je nach gewählter Größe springt das Programm in das zugehörige Unterprogramm. Im Flussdiagramm und in dieser detaillierteren Beschreibung wird der Extraktionsarbeitspunkt als variable Größe gewählt.

Die Eingaberoutine, im vorangegangenen Programm beschrieben, wird auch hier für Extraktionsarbeitspunkt und Quadrupolstärke durchgeführt. Anschließend beginnt eine Schleife, die den Extraktionsarbeitspunkt vom minimalen Wert schrittweise bis zum maximalen Wert variiert. Diese Schleife wird im anschließenden Verlauf auch äußere Schleife genannt. Die erste Aufgabe der Schleife ist es den gesetzten Wert an das Kontrollsystem zu übergeben. Bevor das Programm weiterlaufen kann, muss auf die Ausgabe des Kontrollsystems gewartet werden, dass der gewünschte Extraktionsarbeitspunkt gesetzt wurde. Diese Wartezeit ist von Nöten, da das Einstellen von Beschleunigerparametern mehr Zeit beansprucht, als die Befehlsdurchführung des Programms.

An dieser Stelle beginnt die innere Schleife zur Variation der Quadrupolstärke. Wie im Programm der Dispersionsmessung muss auch hier die Quadrupolstärke über den Strom eingestellt werden. Im Anschluss wird das Auslesen der Strahlbreite über vier Zyklen gestartet. Wie beim Auslesen der Ablage des Strahls wird auch hier ein Mittelwert gebildet und der zugehörige Fehler ermittelt.

Mit Hilfe der zu Beginn des Programms eingegebenen Werte für die Dispersionsfunktion kann nun die Dispersion der vorliegenden Quadrupolstärke berechnet werden. Mit Gleichung 2.12 kann die Strahlbreite des dispersionsfreien Strahls ermittelt werden. Dieser wird inklusive seines Fehlers in eine Matrix geschrieben um einen Verlust der Daten zu verhindern. Die innere Schleife springt zum Anfang zurück und durchläuft diese Routine so oft, bis der Maximalwert der Quadrupolstärke erreicht ist.

An diesem Punkt hat das Programm alle Daten zur Bestimmung der Emittanz für den minimalen Extraktionsarbeitspunkt ausgelesen. Da die Dispersionsmessung fehlerbehaftet ist, können negative dispersionsfreie Strahlbreiten auftreten. Mithilfe einer Schleife durchsucht das Programm alle berechneten Werte und löscht jene, die ein negatives Vorzeichen haben. Es folgt ein Fit in *Gnuplot*, durch den die Parameter  $[\alpha_0\epsilon]$ ,  $[\beta_0\epsilon]$  und  $[\gamma_0\epsilon]$ , sowie deren Fehler bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Parameter und dem durch *Matlab6* bestimmten Minimum des Fits kann nun die Emittanz errechnet werden. Genauere Ausführungen inklusive Formeln dazu befinden sich in Kapitel 5.1.

Das Programm erstellt nun einen Graphen, der die Daten, deren Fehler und den durch *Gnuplot* angefertigten Fit beinhaltet. Weiterhin wird die Emittanz und zugehöriger Fehler im Graph ausgegeben, der durch Eingabe eines gewünschten Dateinamen abgespeichert wird. Es ist möglich, dass der Fit aufgrund von starken Abweichungen einiger Werte den Datenverlauf nicht gut widerspiegelt. Hierzu beinhaltet das Programm die Möglichkeit einzelne Werte zu löschen und einen Fit unabhängig von diesen gewählten Werten durchzuführen. Es werden jeweils neue Graphen ausgegeben, die ebenfalls gespeichert werden können. Falls kein weiterer Fit erstellt werden soll, gibt das Programm eine Sicherungsdatei aus, in der alle ausgelesenen Werte der Strahlbreite und berechnete Werte wie die Twissparameter und die Emittanz, sowie Einstellungen des Beschleunigers angegeben werden. Weiterhin wird in dieser Datei eine Übersicht erstellt, in der zu allen berechneten Emittanzen die jeweils gelöschten Werte des Fits aufgelistet werden. Aufgrund des großen Fehlers der Emittanz, der durch ungenaue Fits hervorgerufen wird, und Sensibilität für kleine Veränderungen kann dieser Vergleich der Werte interessant sein.

Der erste Schleifendurchlauf der äußeren Schleife ist abgeschlossen. Der Extraktionsarbeitspunkt wird an dieser Stelle erhöht und eine neue Berechnung der Emittanz folgt. Man erhält am Ende des Programms für jeden eingestellten Extraktionsarbeitspunkt eine zugehörige Emittanz.

## 7 Auswertung der Programmergebnisse

### 7.1 Dispersionsmessung

Vergleicht man anhand einer Messung die Daten des *Matlab6*-Programms und die Daten, welche manuell aufgezeichnet wurden, so sind diese bis auf die vierte Nachkommastelle identisch. Es gibt jedoch große Unterschiede für die zugehörigen Fehler, was auf unterschiedlichen Ermittlungsweisen beruht. In der manuellen Messung war der Fehler nicht korrekt zu bestimmen, da die Änderungen durch Beobachtung geschätzt werden mussten. In der automatisierten Messung wird weiterhin über vier Zyklen gemittelt, wobei es sich hier um eine rechnerisch korrekte Mittelung handelt. Wie in Kapitel 6.3 erwähnt, wird der Fehler der Ablage durch die Standardabweichung der Mittelung berechnet.

Während die Spalten mit den %-Zeichen jeweils den prozentualen Wert des Fehlers darstellen, wird in der letzten Spalte der Unterschied zwischen den Fehlern aufgezeigt. Es werden hier exemplarisch die Messwerte für drei verschiedene Quadrupolstärken aufgeführt. Die gesamten Messergebnisse befindet sich im Anhang in Tabelle B.6.

$k / \text{m}^{-2}$	$x / \text{mm}$	$\Delta x_{\text{auto}} / \text{mm}$	% <sub>auto</sub>	$\Delta x_{\text{manuell}} / \text{mm}$	% <sub>manuell</sub>	% <sub>manuell</sub> /% <sub>auto</sub>
0.4	-4.1564	0.0268	0.6448	0.05	1.203	1.87
	-3.5750	0.0546	1.5273	0.10	2.797	1.83
	-2.9948	0.0778	2.5978	0.10	3.339	1.29
	-2.3403	0.2223	9.4988	0.20	8.546	0.90
	-2.2081	0.0462	2.0923	0.05	2.264	1.08
0.6	-3.9601	0.0032	0.0808	0.05	1.263	15.63
	-3.5928	0.0276	0.7682	0.05	1.392	1.81
	-3.2553	0.0229	0.7035	0.05	1.536	2.18
	-2.9646	0.0249	0.8399	0.05	1.687	2.01
	-2.7533	0.0242	0.8789	0.05	1.816	2.07
1.6	-2.2059	0.0356	1.6139	0.05	2.267	1.40
	-2.8367	0.0262	0.9236	0.05	1.763	1.91
	-3.4805	0.0645	1.8532	0.10	2.873	1.55
	-3.8366	0.0837	2.1816	0.10	2.606	1.19
	-4.2550	0.1124	2.6416	0.10	2.350	0.89

Tabelle 7.1: Vergleich der manuellen und automatischen Fehler der Ablage.

Offensichtlich ist der manuelle Fehler für fast alle Werte größer. Dabei handelt es sich meist um die Größenordnung 100% bis 200 % des automatischen Fehlers.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der automatische Fehler gegenüber des manuellen Fehlers kleiner ist, wobei sich beide Fehler in einem angemessenen Bereich bis maximal 10% befinden.

Führt man die Geradenfits zu den unterschiedlichen Quadrupolstärken durch und fittet anschließend die bestimmten Dispersionswerte gegen ihre Quadrupolstärke so erhält man:



	automatisch	manuell	%
$D_0/m$	4.2900	4.1388	96.47
$\Delta D_0/m$	0.1012	0.1098	108.50
%	2.36	2.65	
$D'_0$	0.7634	0.7368	96.52
$\Delta D'_0$	0.0181	0.0209	115.47
%	2.37	2.83	

Tabelle 7.2: Vergleich der manuellen und automatischen Fehler der Dispersionsfunktion.

Vergleicht man die ermittelten Werte für die Dispersion, deren Änderung sowie deren Fehler, wird offensichtlich, dass sich die zuvor sehr große Abweichung zu einer kaum unterscheidbaren Abweichung gewandelt hat. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass ein Fit einfacher durch Werte mit größeren Fehlerbalken gelegt werden kann. Bei kleinen Fehlerbalken ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Fit innerhalb der Fehlerbalken liegt wesentlich kleiner und somit ist die Qualität des Fits schlechter.

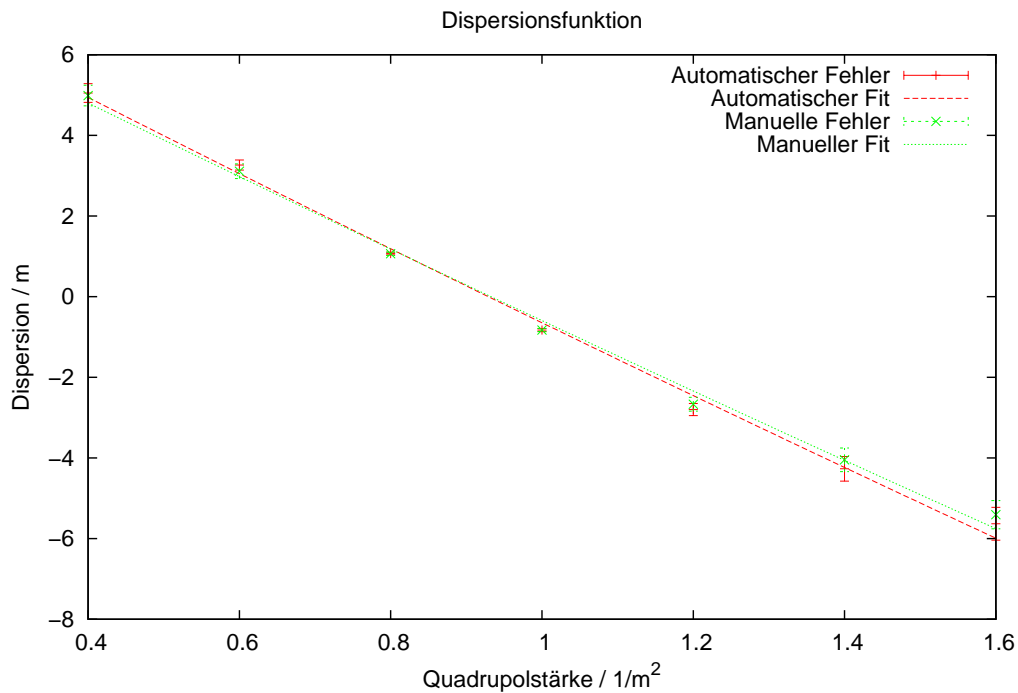


Abbildung 7.1: Fit zur Bestimmung der Dispersion mit automatischem und manuellem Fehler.

Leider wird der Fehler der Dispersion durch die Automatisierung nicht kleiner, sodass der einzige Vorteil durch die deutlich kleinere Mess- und Rechenzeit gegeben ist. Dabei handelt es sich für die Messung um etwa eine Halbierung der Zeit. Je nach Anzahl der Messwerte handelt es sich jetzt nur noch um 30-45 Minuten. Die Rechenzeit ergibt sich zu Null, da das Programm die Berechnung vollautomatisch durchführt. Zuvor betrug die Auswertungszeit mit bereits angefertigten *Gnuplot*-Skripten und *Open-Office-Calc*-Dateien ca. 4-5 Stunden.

## 7.2 Emittanzmessung

Zur Bestimmung der Emittanz muss die Strahlbreite für unterschiedliche Quadrupolstärken vermessen werden. Wie in Kapitel 7.1 weichen die aufgenommenen Daten von den Daten des Programms erst in der vierten Nachkommastelle ab. Durch unterschiedliche Berechnungsverfahren des zugehörigen Fehlers ist auch hier der automatische Fehler kleiner.

Vorerst werden nur die aufgenommenen Daten mit dem durch das Programm bestimmten Fit aufgetragen. Die in Abbildung 7.2 geplotteten Daten befinden sich im Anhang in Tabelle B.5.

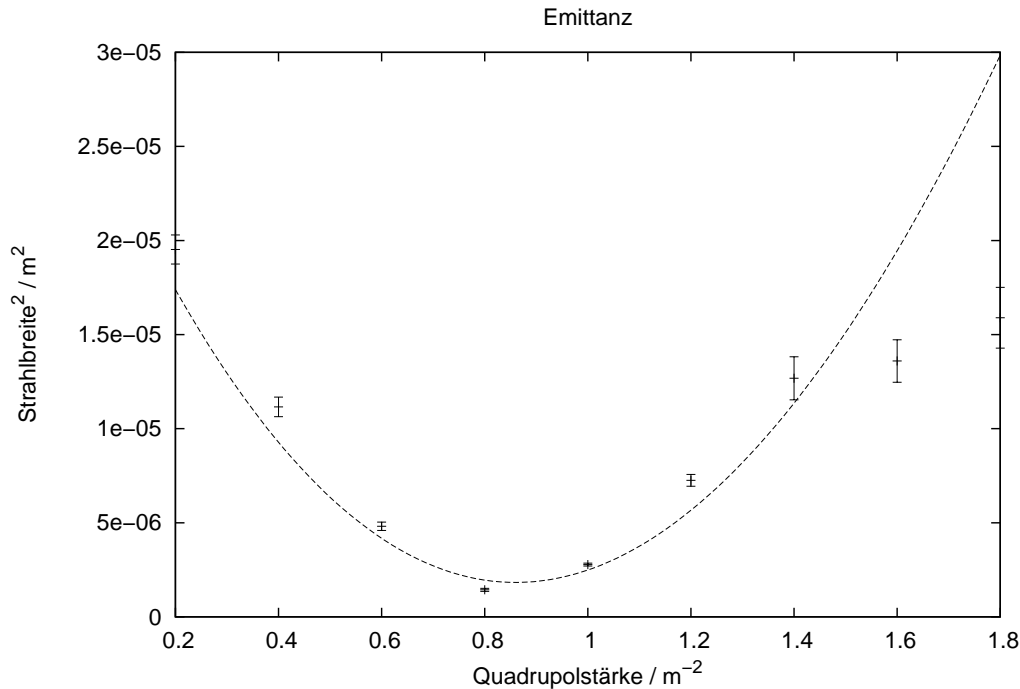


Abbildung 7.2: Fit zur Bestimmung der Emittanz.

Für den in Abbildung 7.2 aufgetragenen Fit erhält man:

$\alpha$	$(-1.0162 \pm 0.5402)$
$\beta$	$(6.7998 \pm 3.1302)\text{m}$
$\gamma$	$(0.2355 \pm 0.1099)\frac{1}{\text{m}}$
Emittanz $\epsilon$	$(1012.1 \pm 361.1)\text{nm rad}$

Tabelle 7.3: Wertetabelle der Twissparameter und der Emittanz.

Der für die Emittanz berechnete Wert liegt nicht innerhalb des erwarteten Wertebereich. Weitere Ausführungen dazu befinden sich in Kapitel 8. Hier sollen nur die Genauigkeiten der Fits und die Abweichungen für unterschiedlich ermittelte Fehler diskutiert werden.

Wie im vorangegangenen Kapitel 7.1 soll der Vergleich von automatisch zu manuell vermessenen Fehlern aufgezeigt werden. Dazu sind in Tabelle 7.4 ebendiese aufgetragen. Während die Spalten betitelt mit  $\%_{\text{auto}}$  und  $\%_{\text{manuell}}$  jeweils den prozentualen Fehler angeben, enthält die letzte Spalte den Vergleich der Fehler.

$k / \text{m}^{-2}$	$x / \text{mm}$	$\Delta x_{\text{auto}} / \text{mm}$	$\%_{\text{auto}}$	$\Delta x_{\text{manuell}} / \text{mm}$	$\%_{\text{manuell}}$	$\%_{\text{manuell}}/\%_{\text{auto}}$
0.20	6.0498	0.0431	0.71	0.10	1.65	2.32
0.40	4.4577	0.0454	1.02	0.10	2.24	2.20
0.60	2.8308	0.0220	0.78	0.10	3.53	4.53
0.80	1.3599	0.0088	0.65	0.05	3.68	5.66
1.00	1.7358	0.0060	0.35	0.05	2.88	8.23
1.20	3.1329	0.0038	0.12	0.05	1.60	13.33
1.40	4.4662	0.1058	2.37	0.20	4.48	1.89
1.60	5.2774	0.0334	0.63	0.10	1.89	3.00
1.80	6.2697	0.0217	0.35	0.10	1.59	4.54

Tabelle 7.4: Fit zur Bestimmung der Emittanz mit automatischem und manuellem Fehler.

Es ist deutlich erkennbar, dass der manuelle Fehler mindestens doppelt so groß ist wie der automatische Fehler. Für die Quadrupolstärke  $k = 1.2 \text{ m}^{-2}$  erreicht der manuelle Fehler sogar mehr als das 13fache. In Abbildung 7.3 werden die Daten inklusive ihrer Fehler und zugehörige Fits aufgetragen.

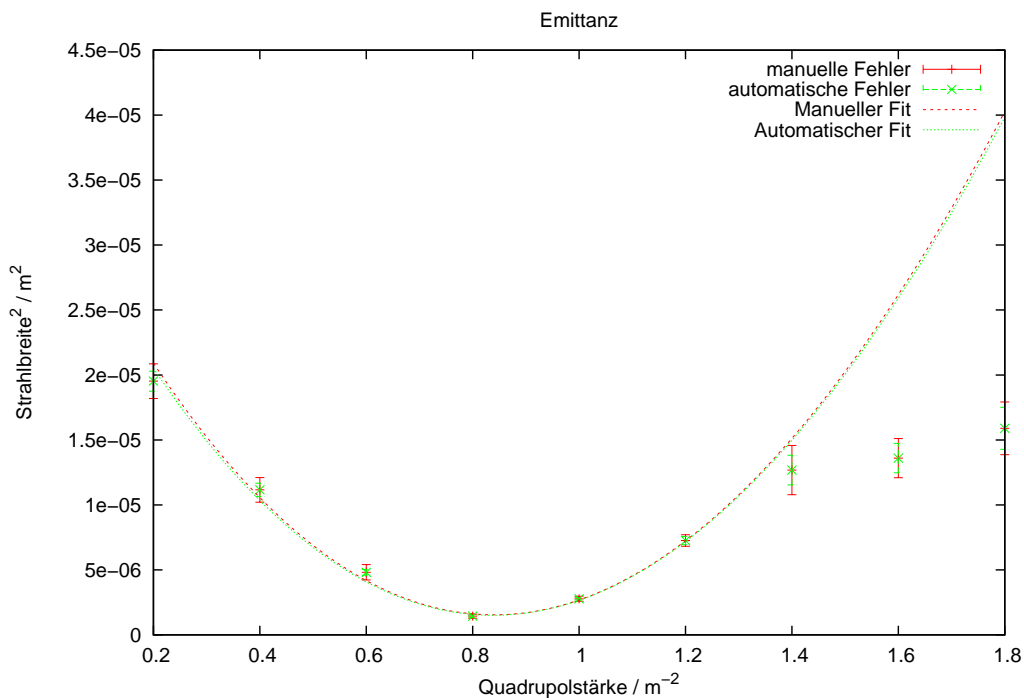


Abbildung 7.3: Fit zur Bestimmung der Emittanz mit automatischem und manuellem Fehler.

Nur bei genauer Betrachtung der Abbildung 7.3 können die Fits unterschieden werden, was durch die Daten für Twissparameter und Emittanz in Tabelle 7.5 bestätigt wird. Auch hier ist der Unterschied der Werte für die Emittanz auf Grund der Fehler nicht erwähnenswert. Für den Fit mit Hilfe der manuellen Fehler ergibt sich ein Fehler für die Emittanz, der 118.36% des automatischen Fehlers entspricht. In Kapitel 7.1 wurde bereits erläutert, dass auf Grund der Methode des Geradenfits die Fehler der Fits und die Fehler der zu fittenden Parameter nicht mehr im selben Verhältnis stehen.

	Fit <sub>auto</sub>	Fit <sub>manuell</sub>
$\alpha$	$(-1.0162 \pm 0.5402)$	$(-0.9399 \pm 0.5402)$
$\beta$	$(6.7998 \pm 3.1302)\text{m}$	$(6.1821 \pm 2.6586)\text{m}$
$\gamma$	$(0.2355 \pm 0.1099)\frac{1}{\text{m}}$	$(0.2296 \pm 0.1193)\frac{1}{\text{m}}$
Emittanz $\epsilon$	$(1012.1 \pm 361.1)\text{nm rad}$	$(1001.2 \pm 427.4)\text{nm rad}$

Tabelle 7.5: Wertetabelle der Twissparameter und der Emittanz.

Im nächsten Abschnitt soll die Sensibilität des Fits und somit der Emittanz und ihrer Fehler untersucht werden. In Abbildung 7.4 sind neben den geplotteten Daten drei Fits aufgetragen. Sie unterscheiden sich in der Wertemenge, an die gefittet wurde. Dabei schließt erster Fit (*grün* markiert) alle geplotteten Werte ein. Offensichtlich weichen die Werte für die Quadrupolstärken  $k = 1.8 \text{ m}^{-2}$  und  $k = 1.6 \text{ m}^{-2}$  von den anderen Werten, die eine parabelähnliche Form darstellen, ab. Zur Untersuchung der Sensibilität der Emittanz werden diese in den anderen beiden Fits herausgenommen. Dabei beinhaltet der *blau* markierte Fit weiterhin den Wert  $k = 1.6 \text{ m}^{-2}$ , im *rot* markierten Fit hingegen werden beide Werte nicht beachtet.

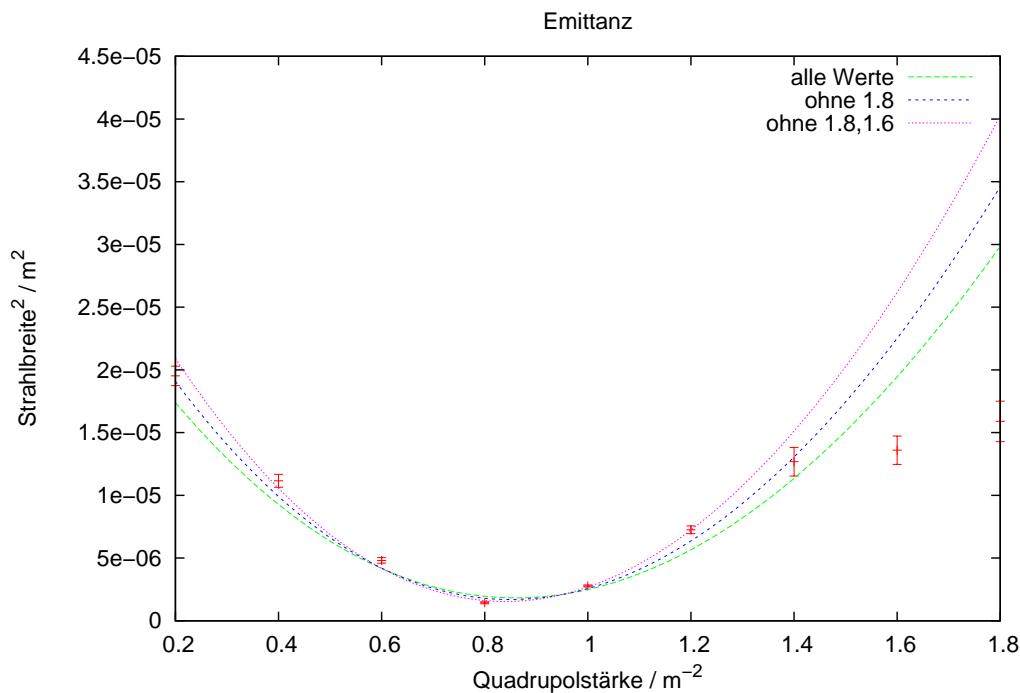


Abbildung 7.4: Fits zur Bestimmung der Emittanz mit unterschiedlichen Datenmengen.

In Tabelle 7.6 sind die zugehörigen Emittanzen angegeben.

Die Ergebnisse liegen zwischen 1012 nm rad und 980 nm rad, was einer Differenz von 3.1% entspricht. Diese Variation ist auf Grund der großen Fehler nicht von Bedeutung. Bemerkenswert ist hingegen, dass der Fehler für den dritten Fit nur 40% des Fehlers des ersten Fits entspricht. Es gilt weiterhin zu untersuchen, warum die im Graph rechts liegenden Werte so stark abweichen und die Fehlergröße vervielfachen (vgl. Kapitel 8).

	Fit <sub>grün</sub>	Fit <sub>blau</sub>	Fit <sub>rot</sub>
$\alpha$	$(-1.0162 \pm 0.5402)$	$(-1.1519 \pm 0.5755)$	$(-1.3142 \pm 0.6198)$
$\beta$	$(6.7998 \pm 3.1302)\text{m}$	$(7.9248 \pm 3.5617)\text{m}$	$(9.3283 \pm 4.1276)\text{m}$
$\gamma$	$(0.2355 \pm 0.1099)\frac{1}{\text{m}}$	$(0.2457 \pm 0.1105)\frac{1}{\text{m}}$	$(0.2574 \pm 0.1107)\frac{1}{\text{m}}$
Emittanz $\epsilon$	$(1012.1 \pm 361.1)\text{nm rad}$	$(1000.5 \pm 287.9)\text{nm rad}$	$(980.1 \pm 147.3)\text{nm rad}$

Tabelle 7.6: Wertetabelle der Twissparameter und der Emittanz.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass wie für die Bestimmung der Dispersion der kleinere Fehler der Messwerte durch die Ungenauigkeit des Fits keinen kleineren Fehler für die Emittanz bewirkt. In Bezug auf die Sensibilität der Emittanz wurde deutlich, dass eine Veränderung der Wertemenge keine großen Abweichungen für den Emittanzwert selbst bewirkt, der Fehler jedoch in großem Maße variiert.

## 8 Fazit und Ausblick

Im folgenden werden die möglichen Erweiterungen des Programms, sowie die Schwierigkeiten der Messmethode diskutiert.

### 8.1 Erweiterung des Programms

Das verfasste Programm bildet eine Grundlage, die auf verschiedenste Weisen verfeinert und ausgeweitet werden kann.

Das Programm kann durch eine graphische Oberfläche im Kontrollsystem bedienungsfreundlicher gestaltet werden, da dieses zur Zeit in einer Konsole ausgeführt werden muss (vgl. Kapitel 6.2).

Weiterhin kann das Programm durch einige Veränderung umgeschrieben werden, sodass auch in der ELAN-Strahlführung die Emittanz vermessen werden kann. Dazu muss die Berechnung der Transfermatrizen verändert werden, da die Längen der Driftstrecken variieren und die Quadrupolstärken von MB2 und MB3 nicht identisch sind. Weiterhin müssen einzelne Befehle für das Kontrollsystem zur Auslese und Veränderung der Parameter abgewandelt werden, um beispielsweise den MB2 durch den MB3 zu ersetzen.<sup>9</sup>

Durch wesentlich weniger Aufwand können die Position und der Winkel der Septumsschneide in das Programm mit einbezogen werden. Dazu müssen in der Case-Abfrage zwei weitere Fälle eingebaut werden. Im wesentlichen sind die Unterprogramme der Case-Abfrage identisch, sie unterscheiden sich nur in der Parametervariation der äußeren Schleife. Weiterhin muss die Routine der Eingabe der Werte in *Matlab6*-Befehle übersetzt werden. Es ist zu untersuchen, ob Verzögerungsschleifen zur Synchronisation von Programm und Beschleuniger eingebaut werden müssen.

Das Programm kann ebenfalls durch einige Veränderungen von Transfermatrizen und Parametern, wie die Strahlblage oder die Strahlposition zu einem Programm umgewandelt werden, dass anstatt der horizontalen Emittanz die vertikale Emittanz vermisst und berechnet.

Zur Perfektion des Programms kann weiterhin eine Pausenoption eingebaut werden, sodass das Programm bei Schwierigkeiten, wie beispielsweise ein zu geringer Strahlstrom in der externen Strahlführung, kurzzeitig gestoppt werden kann um verfälschende Werte oder schlimmstenfalls einen Abbruch zu vermeiden. Leider stellt sich diese Verfeinerung als komplexer heraus, sodass sie in dieser Grundform nicht eingeschlossen ist.

### 8.2 Schwierigkeiten der Messmethode

Durch unerwartete Ergebnisse für die Emittanz nicht nur in den für diese Arbeit durchgeführten Messungen (vgl. Kapitel 7.2), sondern auch in vorangegangene Messungen von Stefan Patzel [Pat09] und Sven Zander [Zan08], wurden verschiedenen Faktoren ins Auge gefasst, die zu so großen Abweichungen führen können. Im Beschleunigerring erhält man eine natürliche Emittanz im Bereich von 480 nm rad. Eine Emittanz von 1000 nm rad ist somit unerwartet groß.

Für die Messung der vertikalen Emittanz sind die erhaltenen Ergebnisse<sup>10</sup> wie erwartet, weshalb als erstes der Vergleich zwischen diesen beiden Messungen gezogen wird. In der Vertikalen gibt es keine Dispersion, wodurch die gemessene Strahlbreite nicht bereinigt werden muss. Die Dispersionsmessung stellt somit die erste Fehlerquelle dar. In durchgeführten Messungen ([Pat09], [Zan08]) wurden auf Grund von sehr großen Dispersionswerten einige bereinigte Strahlbreiten

<sup>9</sup>In Abbildung 1.1 sind die Elemente der ELAN-Strahlführung eingezeichnet, jedoch nicht beschriftet. Der dem Dipol MB2 entsprechende Magnet trägt den Namen MB3.

<sup>10</sup>Es handelt sich hierbei um Messungen von Stefan Patzel [Pat09] und Sven Zander [Zan08].

negativ. Durch diesen Widerspruch wird die Vermutung der Dispersion als Fehlerquelle bestätigt. Ein weiterer Unterschied zwischen der Vertikalen und der Horizontalen ist, dass sich der Arbeitspunkt während eines Zyklus für die Horizontale verändert. In der Vertikalen bleibt dieser stets gleich. Um die Fehlerquelle des Arbeitspunktes zu untersuchen bietet sich eine Messung mit genauerer Zeitauflösung an.

Zur Bestimmung der Strahlablage und Strahlposition wird an das vom Synchrotronlichtmonitor aufgenommene Strahlprofil eine Gaußkurve gefittet. Die Halbwertsbreite wird als Wert der Ablage oder der Position weiterverwendet. Auch hier entstehen einige Fehlerquellen, da es weiterhin zu untersuchen gilt, ob das Strahlprofil einem gaußförmigen Profil entspricht und der Fit nicht frei von Fehlern ist. In dieser Analyse werden die aus dem Kontrollsystem gelesenen Strahlparameter jedoch als fehlerfrei betrachtet.

Anhand der hier genannten Fehlerquellen wird offensichtlich, dass die Methode zur Bestimmung der Emittanz noch ausführlicher untersucht werden muss und an einigen Stellen verbessert werden kann. Das in dieser Arbeit angefertigte *Matlab6*-Programm soll eine Grundlage zur Erleichterung der Messung darstellen. Durch oben genannte Verfeinerungen kann es auf verschiedene Bereiche erweitert werden.

## Literatur

- [Fro10] **Frommberger, Frank:** *Persönliche Mitteilung*, Bonn April/Mai 2010.
- [Hil/Mai09] **Hillert, Wolfgang; Maier, Rudolf:** *Physik der Teilchenbeschleuniger 1*, Universität Bonn, Vorlesungsskript des Wintersemesters 2009/10.
- [Hin07] **Hinterberger, Frank:** *Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2007.
- [Pat09] **Patzelt, Stefan:** *Eine neue externe Strahlführung für Detektortests an ELSA*, Experimentelle physikalische Diplomarbeit des Fachbereichs Physik der Universität Bonn, Bonn November 2009.
- [Pre10] **Preisner, Oliver:** *Persönliche Mitteilung*, Bonn April 2010.
- [Mat00] **The MathWorks, Inc.:** *MATLAB The Language of Technical Computing*, The MathWorks Inc. 2000.
- [Wil96] **Wille, Klaus:** *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, Stuttgart:Teubner 1996.
- [Zan08] **Zander, Sven:** *Strahldiagnose mit Synchrotronlichtmonitoren an der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Experimentelle physikalische Diplomarbeit des Fachbereichs Physik der Universität Bonn, Bonn Februar 2008.



## Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn PD Dr. Wolfgang Hillert für das interessante Thema bedanken. Weiterhin bin ich dankbar für die Möglichkeit, dass ich meine Bachelorarbeit in der Arbeitsgruppe von ELSA schreiben konnte.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Hartmut Schmieden für die Übernahme des Korreferats.

Mein Dank gilt Stefan Patzelt und Sven Zander, die mich während meiner Arbeit betreut haben, meine Fragen beantwortet haben, mich in das Thema der Arbeit eingewiesen haben und meine Arbeit Korrektur gelesen haben.

Herrn Dr. Frank Frommberger danke ich für die Unterstützung, wenn es um Fragestellungen bezüglich des Kontrollsystems und der Software Matlab ging.

## Tabellenverzeichnis

5.1	Eingestellte Parameter in der externen Strahlführung. . . . .	11
7.1	Vergleich der manuellen und automatischen Fehler der Ablage. . . . .	20
7.2	Vergleich der manuellen und automatischen Fehler der Dispersionsfunktion. . . . .	21
7.3	Wertetabelle der Twissparameter und der Emittanz. . . . .	22
7.4	Fit zur Bestimmung der Emittanz mit automatischem und manuellem Fehler. . . . .	23
7.5	Wertetabelle der Twissparameter und der Emittanz. . . . .	24
7.6	Wertetabelle der Twissparameter und der Emittanz. . . . .	25
B.1	Wertetabelle zur Bestimmung der Dispersion bei $k = 0.2 \text{ m}^{-2}$ . . . . .	32
B.2	Wertetabelle zur Bestimmung der Emittanz [Zan08]. . . . .	32
B.3	Wertetabelle zur Bestimmung der Dispersionsfunktion. . . . .	32
B.4	Vergleich der Dispersionswerte und deren Fehler für automatische und manuelle Fehler. . . . .	33
B.5	Wertetabelle für Strahlbreiten zur Bestimmung der Emittanz. . . . .	33
B.6	Vergleich aller manuellen und automatischen Fehler. . . . .	34

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht zur externen Strahlführung von ELSA. . . . .	1
2.1	Dispersionsbahnen von Teilchen mit Impulsabweichung durch einen Dipolmagneten [Pat09]. . . . .	4
2.2	Teilchenverläufe innerhalb der einschließenden Enveloppe des Strahls [Hil/Mai09]. . . . .	5
2.3	Teilchenbewegung im $x-x'$ -Phasenraum. . . . .	6
3.1	Bewegung auf den instabilen Separatrixästen. Die Zahlen stehen für den $n$ -ten Umlauf im Beschleuniger. . . . .	7
5.1	Schematischer Aufbau eines Quadrupolscans [Pat09]. . . . .	10
5.2	Geradenfit zur Bestimmung der Dispersion bei der Quadrupolstärke $k = 0.2 \text{ m}^{-2}$ . . . . .	12
5.3	Fit zur Bestimmung der Dispersionsfunktion. . . . .	13
5.4	Fit zur Bestimmung der Emittanz. . . . .	14
7.1	Fit zur Bestimmung der Dispersion mit automatischem und manuellem Fehler. . . . .	21
7.2	Fit zur Bestimmung der Emittanz. . . . .	22
7.3	Fit zur Bestimmung der Emittanz mit automatischem und manuellem Fehler. . . . .	23
7.4	Fits zur Bestimmung der Emittanz mit unterschiedlichen Datenmengen. . . . .	24
A.1	Lageplan von ELSA. . . . .	31

## A Bilder

## Elektronen-Stretcher-Anlage (ELSA)

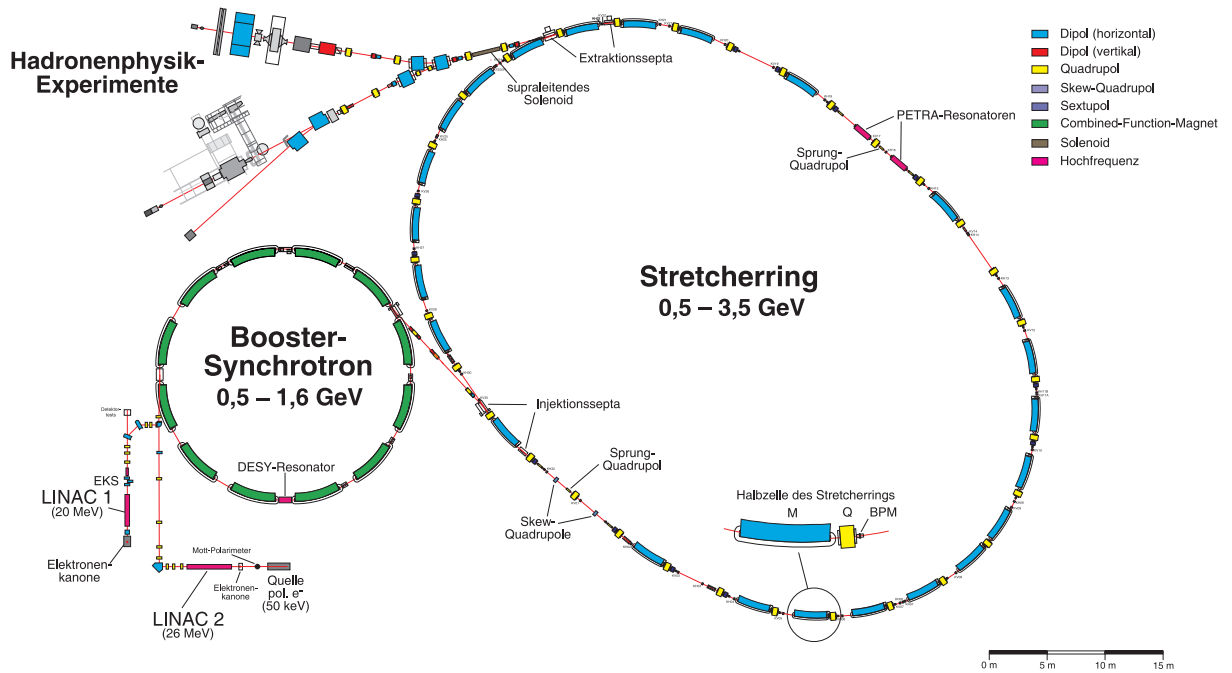


Abbildung A.1: Lageplan von ELSA.

## B Tabellen

$k / \text{m}^{-2}$	$f / \text{MHz}$	$\frac{\Delta f}{f} \frac{1}{\alpha}$	$x / \text{mm}$	$\Delta x / \text{mm}$
0.2	499.654	-0.4890	0.0712	0.0279
0.2	499.657	-0.3912	0.6945	0.0402
0.2	499.660	-0.2934	1.2638	0.0126
0.2	499.663	-0.1956	2.1932	0.0396
0.2	499.666	-0.0978	2.9887	0.0705
0.2	499.669	0.0000	3.8270	0.0462
0.2	499.672	0.0978	4.6835	0.1123
0.2	499.675	0.1956	5.1692	0.2701

Tabelle B.1: Wertetabelle zur Bestimmung der Dispersion bei  $k = 0.2 \text{ m}^{-2}$ .

$k / \text{m}^{-2}$	$\sigma(s) / \text{mm}$	$\Delta\sigma(s) / \text{mm}$	$D(s, k) / \text{m}$	$\Delta D(s, k) / \text{m}$
0.00	4.81	0.10	6.10	0.12
0.20	4.15	0.05	4.91	0.10
0.40	3.37	0.10	3.75	0.09
0.60	2.12	0.05	2.60	0.09
0.80	1.00	0.05	1.46	0.10
1.00	1.57	0.05	0.35	0.11
1.20	2.75	0.05	-0.75	0.13
1.40	3.60	0.10	-1.84	0.16
1.60	4.26	0.10	-2.90	0.18
1.80	4.96	0.10	-3.95	0.20
1.94	5.03	0.10	-4.70	0.22

Tabelle B.2: Wertetabelle zur Bestimmung der Emittanz [Zan08].

$k / \text{m}^{-2}$	$D(s, k) / \text{m}$	$\Delta D(s, k) / \text{m}$
0.2	7.6049	0.4586
0.4	5.6439	0.0689
0.6	3.5253	0.0702
0.8	1.2633	0.0359
1.0	-1.1109	0.0073
1.2	-3.2002	0.0401
1.4	-5.3701	0.0272
1.6	-7.0054	0.1588
1.8	-8.8696	0.0835

Tabelle B.3: Wertetabelle zur Bestimmung der Dispersionsfunktion.

$k / \text{m}^{-2}$	$D(s)_{\text{auto}} / \text{m}$	$D(s)_{\text{manuell}} / \text{m}$	$\Delta D(s)_{\text{auto}} / \text{m}$	$\Delta D(s)_{\text{manuell}} / \text{m}$
0.4	5.0487	4.9869	0.2322	0.2554
0.6	3.2643	3.1102	0.1262	0.1814
0.8	1.0693	1.0629	0.0353	0.0423
1.0	-0.8299	-0.8270	0.0394	0.0378
1.2	-2.7995	-2.6677	0.1492	0.1714
1.4	-4.2694	-4.0470	0.3068	0.2920
1.6	-5.6325	-5.4056	0.4058	0.3499

Tabelle B.4: Vergleich der Dispersionswerte und deren Fehler für automatische und manuelle Fehler.

$k / \text{m}^{-2}$	$x / \text{mm}$	$\Delta x / \text{mm}$	$\sigma^2 / \text{nm}$	$\Delta\sigma^2 / \text{nm}$
0.20	6.0498	0.0431	19.5266	0.7743
0.40	4.4577	0.0454	11.1572	0.5189
0.60	2.8308	0.0220	4.8134	0.2229
0.80	1.3599	0.0088	1.4363	0.0816
1.00	1.7358	0.0060	2.7762	0.0782
1.20	3.1329	0.0038	7.2572	0.3134
1.40	4.4662	0.1058	12.6815	1.1438
1.60	5.2774	0.0334	-13.5996	1.1283
1.80	6.2697	0.0217	-15.8989	1.6160

Tabelle B.5: Wertetabelle für Strahlbreiten zur Bestimmung der Emittanz.

$k / \text{m}^{-2}$	$x / \text{mm}$	$\Delta x_{\text{auto}} / \text{mm}$	$\%_{\text{auto}}$	$\Delta x_{\text{manuell}} / \text{mm}$	$\%_{\text{manuell}}$	$\%_{\text{manuell}}/\%_{\text{auto}}$
0.4	-4.1564	0.0268	0.6448	0.05	1.203	1.87
	-3.5750	0.0546	1.5273	0.10	2.797	1.83
	-2.9948	0.0778	2.5978	0.10	3.339	1.29
	-2.3403	0.2223	9.4988	0.20	8.546	0.90
	-2.2081	0.0462	2.0923	0.05	2.264	1.08
0.6	-3.9601	0.0032	0.0808	0.05	1.263	15.63
	-3.5928	0.0276	0.7682	0.05	1.392	1.81
	-3.2553	0.0229	0.7035	0.05	1.536	2.18
	-2.9646	0.0249	0.8399	0.05	1.687	2.01
	-2.7533	0.0242	0.8789	0.05	1.816	2.07
0.8	-3.5723	0.0070	0.1960	0.05	1.400	7.14
	-3.4528	0.0058	0.1680	0.05	1.448	8.62
	-3.3358	0.0140	0.4197	0.05	1.499	3.57
	-3.2537	0.0072	0.2213	0.05	1.537	6.94
	-3.1521	0.0122	0.3870	0.05	1.586	4.10
1.0	-3.3340	0.0102	0.3059	0.05	1.500	4.90
	-3.4210	0.0089	0.2602	0.05	1.462	5.62
	-3.5152	0.0104	0.2959	0.05	1.422	4.81
	-3.5920	0.0057	0.1587	0.05	1.392	8.77
	-3.6529	0.0085	0.2327	0.05	1.369	5.88
1.2	-3.0852	0.0075	0.2431	0.05	1.621	6.67
	-3.4035	0.0197	0.5788	0.05	1.469	2.54
	-3.6865	0.0306	0.8301	0.05	1.356	1.63
	-3.8952	0.0327	0.8395	0.05	1.284	1.53
	-4.0815	0.0516	1.2642	0.10	2.450	1.94
1.4	-2.6877	0.0245	0.9116	0.05	1.860	2.04
	-3.2144	0.0309	0.9613	0.05	1.556	1.62
	-3.6137	0.0204	0.5645	0.05	1.384	2.45
	-3.8953	0.0500	1.2836	0.05	1.284	1.00
	-4.2878	0.0589	1.3737	0.10	2.332	1.70
1.6	-2.2059	0.0356	1.6139	0.05	2.267	1.40
	-2.8367	0.0262	0.9236	0.05	1.763	1.91
	-3.4805	0.0645	1.8532	0.10	2.873	1.55
	-3.8366	0.0837	2.1816	0.10	2.606	1.19
	-4.2550	0.1124	2.6416	0.10	2.350	0.89

Tabelle B.6: Vergleich aller manuellen und automatischen Fehler.

## C Quelltexte des Programms

### C.1 Dispersionsmessung

```

%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
% x Messung der Dispersion x
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

%Definition genutzter Variablen
a=0; l=0.4749;

%Preallocating der Matrizen
D=zeros(4,1);
E=zeros(4,1);

%Eingabe der Quadrupolstärken
kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
keend=input('Eingabe der groessten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');

while(kebegin>keend)
    fprintf('Die eingegebenen Quadrupolstaerken sind ungueltig.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
    keend=input('Eingabe der groessten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
end

kestep=input('Eingabe der Schrittweite: ');

while(kestep==0)
    fprintf('Die Schrittweite kann nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kestep=input('Eingabe der Schrittweite: ');
end

%Eingabe der Frequenzen
fbegin=input('Eingabe der kleinsten Frequenz in MHz: ');
fend=input('Eingabe der groessten Frequenz in MHz: ');

while(fbegin>fend)
    fprintf('Die eingegebenen Frequenzen sind ungueltig.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    fbegin=input('Eingabe der kleinsten Frequenz in MHz: ');
    fend=input('Eingabe der groessten Frequenz in MHz: ');
end
fstep=input('Eingabe der Schrittweite in MHz:');
while(fstep==0)
    fprintf('Die Schrittweite kann nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    fstep=input('Eingabe der Schrittweite: ');
end

%Preallocating der Matrizen
A=zeros(((keend-kebegin)/kestep)+1,3);
B=zeros((round((keend-kebegin)/kestep)+1)*(round((fend-fbegin)/fstep)+1),5);
C=zeros((round((keend-kebegin)/kestep)+1)*(round((fend-fbegin)/fstep)+1),4);

%Variation der Quadrupolstaerke in for-Schleife
ccs_wait_get('EXT_FGRABBER2_CTRL.CYCLE_DM',0);
for i=kebegin:kestep:keend

    %Einstellung der Quadrupolstärke im Kontrollsystem
    energie=ccs_get('ELS_ENERGY_MODEL.EXTENERGY_AC');
    strom=0.025^2*energie/(2*0.2998*4*3.1416*10^-7*11)*i;
    ccs_put('EXT_MAGNETE_QF1.STROM_AC',strom);
    fprintf('    ... eingestellte Quadrupolstaerke des QF1: %f 1/m^2\n', i);
    pause(1);

    %Anzahl der Schleifendurchläufe
    index=round((i-kebegin)/kestep)+1;

```

```

%Variation der Frequenz in for-Schleife
for j = fbegin:fstep:fend

    %Einstellung der Frequenz in daHz
    fdaHz=j*10^5;
    ccs_put('ELS_HF_MASTER.FREQ_DC',fdaHz);
    ccs_wait_get('EXT_FGRABBER2_CTRL.CYCLE_DM',0);
    fprintf(' ... eingestellte Frequenz: %f MHz\n', fdaHz/10^5);

    %Anzahl der Schleifendurchläufe
    index2 = round((j-fbegin)/fstep+1);
    %Zuordnung der Spalten der Matrix
    laufindex=(index-1)*a+index2;

    %Befüllung der Matrix mit Quadrupolstärke, Frequenz in Hz, delta f /(f_0*alpha)
    B(laufindex,1)=i;
    z=j*10^6;
    B(laufindex,2)=z;
    y=(z-499669000)/(499669000/16.289);
    B(laufindex,3)=y;

    %Einlesen der Ablage, Befüllung der Matrix mit Ablage in m
    for k=1:1:4
        ccs_wait_get('EXT_FGRABBER2_CTRL.CYCLE_DM',0);
        D(1,k)=ccs_get('EXT_FGRABBER2_BPOS.X_AD');
    end
    ablage=(D(1,1)+D(1,2)+D(1,3)+D(1,4))/4;
    ablagem=ablage*0.001;
    B(laufindex,4)=ablagem;

    %Berechnung Fehler der Ablage in m durch Mittelung,
    %Befüllung der Matrix mit Fehler der Ablage in m
    sum=0;
    for l=1:1:4
        sum=sum+(D(1,l)-ablage)^2;
    end
    deltaablage=sqrt(0.25*(sum));
    deltaablagem=deltaablage*0.001;
    B(laufindex,5)=deltaablagem;

    %Befüllung der Matrix C in lesbaren Einheiten
    C(laufindex,1)=i; %Quadrupolstärke
    C(laufindex,2)=j; %Frequenz
    C(laufindex,3)=ablage;
    C(laufindex,4)=deltaablage;

end

%Schleifendurchläufe der Frequenzschleife
a=index2;

%Daten fuer Fit in txt-Datei schreiben
fid=fopen('daten.txt', 'w');
for j=(index-1)*a+1:1:index*a
    fprintf(fid, '%0.10f \t %0.10f \t %0.10f \n', B(j,3), B(j,4), B(j,5));
end
fclose(fid);

%Gnuplotskript in Datei schreiben
fid = fopen('Gnuplotskript.txt', 'w');
gp='f(x)=a*x+b';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='set fit errorvariables';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='fit f(x) "daten.txt" using 1:2:3 via a,b';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp = 'set print "temp.txt" ';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp = 'print a, a_err, b, b_err' ; %Ausgabe der Parameter

```



```

fprintf(fid, '%s\n', gp);
fclose(fid);

%Gnuplotskript durchfuehren
eval(['!gnuplot ', 'Gnuplotskript.txt']);

%Errechnete Werte an Matlab uebergeben
load temp.txt
temp;

%Umbenennung der ausgegebenen Parameter
dispersion=temp(1,1); deltadispersion=temp(1,2);
n=temp(1,3); deltan=temp(1,4);

%Definition der Fitgeraden
funktiondispersion=dispersion*B((index-1)*a+1:index*a,3)+n;

%Befuellung der Matrix A mit Quadrupolstaerke,
%Dispersion und Fehler der Dispersion
A(index,1)=i;
A(index,2)=dispersion;
A(index,3)=deltadispersion;
end

%Matrizenoptik
l=0.4749;
%Einlesen der Quadrupolstaerke kQD1 und der Ablenkwinkel
kQD1=ccs_get('EXT_MAGNETE_QD1.KFOK_AC');

phiMB2=ccs_get('EXT_MAGNETE_MB23.WINKEL_AD');
phiMB2m=phiMB2*10^-3;
phiMB2strich=-asin(sin(phiMB2m)/1.08*0.1999);

phiMB1=ccs_get('EXT_MAGNETE_MB1.WINKEL_AD');
phiMB1m=-phiMB1*10^-3;

phiSSH2=ccs_get('EXT_MAGNETE_SSH2.WINKEL_AD');
phiSSH2m=-phiSSH2*10^-3;
if phiSSH2m==0
    phiSSH2m=0.00001;
end

%Bestimmung der Radien
R1=abs(1.08/sin(phiMB1m));
R2=abs(1.08/sin(phiMB2m));
R3=abs(0.34/sin(phiSSH2m));

%Berechnung der Transfermatrix
H=[cos(phiMB2strich),R2*sin(phiMB2strich);
   -1/R2*sin(phiMB2strich), cos(phiMB2strich)];
I=[1,1.03;0,1];
J=[1,0;-1/R1*tan(-phiMB1m),1];
K=[cos(phiMB1m),R1*sin(phiMB1m);-1/R1*sin(phiMB1m), cos(phiMB1m)];
L=[1,1.04;0,1];
R=[1,0;-1/R3*tan(-phiSSH2m),1];
N=[cos(phiSSH2m),R3*sin(phiSSH2m);-1/R3*sin(phiSSH2m), cos(phiSSH2m)];
O=[1,0.25;0,1];
P=[cosh(0.4749*sqrt(abs(kQD1))),1/sqrt(abs(kQD1))*sinh(0.4749*sqrt(abs(kQD1)));
   sqrt(abs(kQD1))*sinh(0.4749*sqrt(abs(kQD1))),cosh(0.4749*sqrt(abs(kQD1)))]];
Q=[1,2.77;0,1];

M=H*I*J*K*L*R*N*O*P*Q;
m11=M(1,1); m12=M(1,2); m21=M(2,1); m22=M(2,2);

%Größen zur Berechnung des Fit zur Bestimmung der Dispersionsfunktion
a=index;

%Daten fuer Fit in Datei schreiben
fid=fopen('daten.txt', 'w');
for i=1:index

```

```

    fprintf(fid, '%0.10f \t %0.10f \t %0.10f \n', A(i,1), A(i,2), A(i,3));
end
fclose(fid);

%Parameter fuer Fit in Datei schreiben
fid=fopen('Zwischenspeicher.txt', 'w');
fprintf(fid, 'm(x)=%f \n', m11);
fprintf(fid, 'n(x)=%f \n', m12);
fprintf(fid, 'o(x)=0.4749');
fclose(fid);

%Gnuplotsript in Datei schreiben
fid = fopen('Gnuplotskript.txt', 'w');
gp='load "Zwischenspeicher.txt"';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='f(x)=a*(m(x)*cos(o(x)*sqrt(x))-n(x)*sqrt(x)*sin(sqrt(x)*o(x)))
+b*(m(x)/sqrt(x)*sin(sqrt(x)*o(x))+n(x)*cos(sqrt(x)*o(x)))';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='set fit errorvariables';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='fit f(x) "daten.txt" using 1:2:3 via a,b';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp = 'set print "temp.txt" ';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp = 'print a, a_err, b, b_err' ;
fprintf(fid, '%s\n', gp);
fclose(fid);

%Gnuplotsript durchfuehren
eval(['!gnuplot ', 'Gnuplotskript.txt']);

%Errechnete Werte an Matlab uebergeben
load temp.txt
temp;

%Umbenennung der ausgegebenen Parameter
D_0=temp(1,1); deltaD_0=temp(1,2);
D_0strich=temp(1,3); deltaD_0strich=temp(1,4);

%Fit umdefinieren zur Ausgabe in Graphik
for k=1:index
    funktionDk(k,1)=D_0*(m11*cos(1*sqrt(A(k,1)))
    -m12*sqrt(A(k,1))*sin(sqrt(A(k,1))*1))
    +D_0strich*(m11/sqrt(A(k,1))*sin(sqrt(A(k,1))*1)
    +m12*cos(sqrt(A(k,1))*1));
end

%Wechsel des Verzeichnis
cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Dispersion/Werte;

%Erstellen des Graphs Dispersion vs Quadrupolstaerke
fig=figure(1)
errorbar(A(1:index,1),A(1:index,2),A(1:index,3),'x')
hold on;
plot(A(1:index,1),funktionDk)
gtext(strcat('D_0=',num2str(D_0),' +/-',num2str(deltaD_0)));
gtext(strcat('D_0'='',num2str(D_0strich),
' +/-',num2str(deltaD_0strich)));
title('Dispersion vs Quadrupolstaerke')
xlabel('Quadrupolstaerke des QF1 in 1/m^2')
ylabel('Dispersion in m')
bild=input('Eingabe des Namen der Graphik
zur Speicherung (ohne Endung):','s');
saveas(gcf,bild,'eps');
hold off;

%Speichern der Daten
name=input('Eingabe des Namen der txt-Datei
zur Speicherung der Daten (.txt nicht vergessen!),'s');
fid=fopen(name, 'w');
```

```

fprintf(fid,'k in 1/m^2 \t f in MHz \t x in mm \t delta x in mm \n \n');
for i=1:1:(round((keend-kebegin)/kestep)+1)*(round((fend-fbegin)/fstep)+1)
    fprintf(fid, '%0.4f \t \t %0.4f \t %0.4f \t %0.4f \n',
        C(i,1), C(i,2), C(i,3), C(i,4));
end
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid,'k in 1/m^2 \t D in m \t delta D in m \n \n');
for i=1:1:((keend-kebegin)/kestep)+1)
    fprintf(fid, '%0.4f \t \t %0.4f \t %0.4f \n',
        A(i,1), A(i,2), A(i,3));
end
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid,'D_0= %0.4f \t delta D_0= %0.4f \t D_0'=' %0.4f \t
delta D_0'=' %0.4f \n \n', D_0, deltaD_0, D_0strich, deltaD_0strich );
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid, 'kQD1=%0.4f 1/m^2\t Winkel des MB2=%0.4f mrad\t
    Radius des MB2=%0.4f m\t Winkel des MB1=%0.4f mrad\t
    Radius des MB1=%0.4f m\t Winkel des SSH2=%0.4f mrad\t
    Radius des SSH2=%0.4f m\t Energie=%0.4f GeV',
    kQD1, phiMB2, R2, phiMB1, R1, phiSSH2, R3, energie);
fprintf(fid, '\n \n');
fprintf(fid, 'm11=%0.4f \t m12=%0.4f \t m21=%0.4f \t m22=%0.4f \t',
    m11, m12, m21, m22);
fclose(fid);

%Wechsel des Verzeichnis
cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Dispersion;

```

## C.2 Emittanzmessung

### C.2.1 Hauptprogramm Emittanzmessung

```

%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
% x Messung der Emittanz x
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

%Definition genutzter Variablen
a=0; l=0.4749;

%Preallocating der Matrizen
D=zeros(4,1);
E=zeros(4,1);
alphaemittanzv=zeros(10,1);
betaemittanzv=zeros(10,1);
gammaemittanzv=zeros(10,1);
strahltaillv=zeros(10,1);
emittanzv=zeros(10,1);
loesch=zeros(6,10);

%Matrizenoptik
%Einlesen der Quadrupolstaerke kQD1 und der Ablenkwinkel
kQD1=ccs_get('EXT_MAGNETE_QD1.KFOK_AC');

phiMB2=ccs_get('EXT_MAGNETE_MB23.WINKEL_AD');
phiMB2m=phiMB2*10^-3;
phiMB2strich=-asin(sin(phiMB2m)/1.08*0.1999);

phiMB1=ccs_get('EXT_MAGNETE_MB1.WINKEL_AD');
phiMB1m=-phiMB1*10^-3;

phiSSH2=ccs_get('EXT_MAGNETE_SSH2.WINKEL_AD');
phiSSH2m=-phiSSH2*10^-3;
if phiSSH2m==0
    phiSSH2m=0.00001;
end

%Bestimmung der Radien
R1=abs(1.08/sin(phiMB1m));
R2=abs(1.08/sin(phiMB2m));

```

```

R3=abs(0.34/sin(phiSSH2m));

%Berechnung der Transfermatrix
H=[cos(phiMB2strich),R2*sin(phiMB2strich);
  -1/R2*sin(phiMB2strich), cos(phiMB2strich)];
I=[1,1.03;0,1];
J=[1,0;-1/R1*tan(-phiMB1m),1]
K=[cos(phiMB1m),R1*sin(phiMB1m);-1/R1*sin(phiMB1m), cos(phiMB1m)];
L=[1,1.04;0,1];
R=[1,0;-1/R3*tan(-phiSSH2m),1];
N=[cos(phiSSH2m),R3*sin(phiSSH2m);-1/R3*sin(phiSSH2m), cos(phiSSH2m)];
O=[1,0.25;0,1];
P=[cosh(0.4749*sqrt(abs(kQD1))),1/sqrt(abs(kQD1))*sinh(0.4749*sqrt(abs(kQD1)));
  sqrt(abs(kQD1))*sinh(0.4749*sqrt(abs(kQD1))),cosh(0.4749*sqrt(abs(kQD1)))];
Q=[1,2.77;0,1];

M=H*I*J*K*L*R*N*O*P*Q;
m11=M(1,1); m12=M(1,2); m21=M(2,1); m22=M(2,2);

fprintf('\n Folgend muessen einige Werte aus der zuvor
  durchgefuehrten Dispersionsmessung eingegeben werden. \n');
D_0=input('\n Bitte den Wert von D_0 eingeben: ');
deltaD_0=input('\n Bitte den Wert des Fehlers von D_0 eingeben: ');
D_0strich=input('\n Bitte den Wert der Aenderung von D_0 eingeben: ');
deltaD_0strich=input('\n Bitte den Wert des Fehlers der Aenderung von D_0 eingeben: ');

fprintf('Extraktionsarbeitspunkt = q,\nSextupolstaerke = m\n');
dec=0;
while dec==0
  decide=input('\nWelche der oben genannten Groessen soll variiert werden?:
    (q/m)', 's');
  switch decide
    case 'q'
      Extraktionsarbeitspunkt;
  end
end

Hier beginnt das Unterprogramm Extraktionsarbeitspunkt (vgl. Kapitel C.2.2).

  dec=1;

  case 'm'
    Sextupolstaerke;

Hier beginnt das Unterprogramm Sextupolstaerke (vgl. Kapitel C.2.3).

  dec=1;

  otherwise
    fprintf('\nDas war ein ungueltiges Zeichen. ');
    dec=0;
  end
end

```

## C.2.2 Unterprogramm Extraktionsarbeitspunkt

```

%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
% x Extraktionsarbeitspunkt x
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

%Eingabe der Extraktionsarbeitspunkte
Qbegin=input('Eingabe des kleinsten Extraktionsarbeitspunkt:');
Qend=input('Eingabe des groessten Extraktionsarbeitspunkt:');

while(Qbegin>Qend)
  fprintf('Die eingegebenen Extraktionsarbeitspunkte sind ungueltig.
  \nBitte neue Eingabe machen: \n')
  Qbegin=input('Eingabe des kleinsten Extraktionsarbeitspunkt:');
  Qend=input('Eingabe des groessten Extraktionsarbeitspunkt:');
end

```

```

Qstep=input('Eingabe der Schrittweite:');

while(Qstep==0)
    fprintf('Die Schrittweite kann nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    Qstep=input('Eingabe der Schrittweite:');
end

%Eingabe der Quadrupolstärken
kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
while (kebegin==0)
    fprintf('Die eingegebene Quadrupolstaerke darf nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
end
keend=input('Eingabe der groessten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');

while(kebegin>keend)
    fprintf('Die eingegebenen Quadrupolstaerken sind ungueltig.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
    while (kebegin==0)
        fprintf('Die eingegebene Quadrupolstaerke darf nicht Null sein.
        \nBitte neue Eingabe machen: \n')
        kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
    end
    keend=input('Eingabe der groessten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
end

kestep=input('Eingabe der Schrittweite: ');

while(kestep==0)
    fprintf('Die Schrittweite kann nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kestep=input('Eingabe der Schrittweite: ');
end

%Preallocating der Matrizen
F=zeros((round((Qend-Qbegin)/Qstep)+1)*(round((keend-kebegin)/kestep)+1),10);
G=zeros((round((keend-kebegin)/kestep)+1),1);

%Variation des Extraktionsarbeitspunktes in for-Schleife
for i=Qbegin:Qstep:Qend

    %Löschen im Kontrollsystem
    ccs_put('ELS_MAGNETE_BRIDGE.SELECT_DC',0);
    ENERGY =ccs_get('ELS_MAGNETE_DIPOL.ENERGIE_AC');
    ENERGY=ENERGY+0.001;
    pause(1);
    ccs_put('ELS_MAGNETE_DIPOL.ENERGIE_AC',ENERGY);
    pause(1);

    %Einstellung des Extraktionsarbeitspunkt im Kontrollsystem
    ccs_put('ELS_ENERGY_MODEL.QXEX_AC',i);
    fprintf('    ... eingestellter Arbeitspunkt: %f \n', i);

    %Rampen neu setzen im Kontrollsystem
    ccs_put('ELS_ENERGY_MODEL.COMD_DC', 20);
    pause(30);
    status=ccs_string_get('ELS_ENERGY_MODEL.STATUS_SM');
    j=0;
    while j==0
        status2=strcmp(status, 'Rampen berechnet und gesetzt. ');
        if status2==1
            j=1;
        else
            status3=strcmp(status, 'Berechne Rampen... ');
            if status3==1
                pause(5);
                j=0;
            end
        end
    end
end

```

```

else
    status4=strncmp(status,'Fehler beim Laden',17);
    if status4==1
        ccs_put('ELS_ENERGY_MODEL.COMD_DC', 20);
        pause(30);
        status=ccs_string_get('ELS_ENERGY_MODEL.STATUS_SM');
        j=0;
    else
        fprintf('Es liegt ein größeres Problem vor.
        \nBitte Fehler beseitigen.\n')
        error(' ');
    end
end
end
end

pause(30);

%Anzahl der Schleifendurchläufe
index3=round((i-Qbegin)/Qstep)+1;

Quadrupolschleife;

```

Hier beginnt das Unterprogramm Quadrupolschleife (vgl. Kapitel C.2.4).

```

%Definition der zu fittenden Parameter
quadrupolstaerke=F(laufindex2-a+1:laufindex2,2);
sigmaemittanz2=F(laufindex2-a+1:laufindex2,9);
deltasigmaemittanz2=F(laufindex2-a+1:laufindex2,10);
del=0;

%Zeilen mit negativen Emittanzen werden gelöscht
laenge=size(quadrupolstaerke,1);
for j=laenge:-1:1
    if sigmaemittanz2(j,1)<0
        del=del+1;
        loesch(1,del)=quadrupolstaerke(j,1);
        quadrupolstaerke(j,:)=[];
        sigmaemittanz2(j,:)=[];
        deltasigmaemittanz2(j,:)=[];
    end
end

laenge2=size(quadrupolstaerke,1);

%Neue Definition der Parameter zum mehrfachen Schleifendurchlauf
quadrupolstaerkeoriginal=quadrupolstaerke;
sigmaemittanz2original=sigmaemittanz2;
deltasigmaemittanz2original=deltasigmaemittanz2;
deloriginal=del;

%Daten fuer Fit in Datei schreiben
fid=fopen('Zwischenspeicher1.txt', 'w');
for j=laufindex2-a+1:1:laenge2
    fprintf(fid, '%f \t %0.10f \t %0.10f \n', quadrupolstaerke(j,1),
    sigmaemittanz2(j,1), deltasigmaemittanz2(j,1));
end
fclose(fid);

Fit;

```

Hier beginnt das Unterkapitel Fit (vgl. Kapitel C.2.5).

```

%Umbenennung der auszugebenden Parameter
alphaemittanzv(1,1)=alphaemittanz*10^6;
betaemittanzv(1,1)=betaemittanz*10^6;
gammaemittanzv(1,1)=gammaemittanz*10^6;

```

```

deltaalphaemittanzv(1,1)=deltaalphaemittanz*10^6;
deltabetaemittanzv(1,1)=deltabetaemittanz*10^6;
deltagammaemittanzv(1,1)=deltagammaemittanz*10^6;
strahltaillv(1,1)=strahltaille*10^6;
emittanzv(1,1)=emittanz*10^6;
%Es können knusprige Ergebnisse bei der Bestimmung der Emittanz entstehen! ;-
deltaemittanzv(1,1)=deltaemittanz*10^6;
minv(1,1)=min;

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz/Werte;

%Erstellen und Speichern des Graphs Strahlbreite vs Quadrupolstärke
fig=figure(index3)
errorbar(F(laufindex2-a+1:laufindex2,2),
  F(laufindex2-a+1:laufindex2,9),
  F(laufindex2-a+1:laufindex2,10),'x')
hold on;
plot(w,funktionemittanz)
title(strcat('Emittanz bei Qx=',num2str(i)))
xlabel('Quadrupolstaerke des QF1 / 1/m^2')
ylabel('Strahlbreite^2 / m^2')
gtext(strcat('Emittanz=',num2str(emittanz),'
  +/-' ,num2str(deltaemittanz)));
bild=input('Eingabe des Namen der Graphik zur Speicherung
  ohne Endung):','s');
saveas(gcf,bild,'eps');
hold off;

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz;

%Schleife zur Neuerstellung weiterer Fits mit weniger Werten in
%Abhängigkeit der zugehörigen Fehler
zaehler=1;
j=0;
delmax=0;
while j==0
  if del>delmax;
    delmax=del;
  end

  quadrupolstaerke=quadrupolstaerkeoriginal;
  sigmaemittanz2=sigmaemittanz2original;
  deltasigmaemittanz2=deltasigmaemittanz2original;
  del=deloriginal;

  %Abfrage ob ein weiterer Fit erstellt werden soll
  decide=input('\n Ist der Fit an die Werte zufriedenstellend?:
  (Y/N) ','s');
  decide_upper=upper(decide);
  switch decide_upper
    case 'N'
      CaseN;

```

Hier beginnt das Unterprogramm CaseN (vgl. Kapitel C.2.6).

```

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz/Werte;
%Erstellen des Graphs Strahlbreite vs Quadrupolstärke
fig=figure(index3)
errorbar(F(laufindex2-a+1:laufindex2,2),
  F(laufindex2-a+1:laufindex2,9),
  F(laufindex2-a+1:laufindex2,10),'x')
hold on;
plot(w,funktionemittanz)
gtext(strcat('Emittanz=',num2str(emittanz),'
  +/-' ,num2str(deltaemittanz)));
title(strcat('Emittanz bei Qx=',num2str(i)))
xlabel('Quadrupolstaerke des QF1 in 1/m^2')

```

```

ylabel('Strahlbreite^2 in m^2')
bild=input('Eingabe des Namen der Graphik zur Speicherung
(ohne Endung):','s');
saveas(gcf,bild,'eps');
hold off;

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz;
j=0;

case 'Y'
j=1;

otherwise
fprintf('\n Das war ein ungueltiges Zeichen.');
```

```

end
end

%Schleife zur Ausgabe der geloeschten Werte
for ls=2:1:zaehler
for lss=1:1:deloriginal
loesch(ls,lss)=loesch(1,lss);
end
end

%Speichern der Daten
name=input('Eingabe des Namen der txt-Datei zur Speicherung der Daten
(.txt nicht vergessen!):','s');

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz/Werte;

fid=fopen(name, 'w');
fprintf(fid, 'Der Arbeitspunkt betraegt: %0.4f', i);
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid, 'k in 1/m^2 \t Strahlbreite x in mm \t delta x in mm
\t Sigma Emittanz *10^6 \t delta sigma Emittanz *10^6\n \n');
for j=1:1:index4
fprintf(fid, '%0.4f \t %0.4f \t %0.4f \t %0.4f \t %0.4f \n',
G(j,1), G(j,2), G(j,3), G(j,4), G(j,5));
end
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid, 'Graphik Nr. \t alpha*Emittanz *10^6 \t
Fehler von alpha*Emittanz *10^6 \t beta*Emittanz *10^6 \t
Fehler von beta*Emittanz *10^6 \t gamma*Emittanz *10^6 \t
Fehler von gamma*Emittanz *10^6 \t Strahltaille *10^6 \t
Quadrupolstaerke in der Strahltaille \t Emittanz *10^6 \t
Fehler der Emittanz *10^6 \n \n');
for j=1:1:zaehler
fprintf(fid, '%.0f \t %0.4f \t %0.4f \t %0.4f \t
%0.4f \t %0.4f \t %0.4f \t %0.4f \t
%0.4f \t %0.4f \t %0.4f \t %0.4f \n',
j,alphaemittanzv(j,1), deltaalphaemittanzv(j,1),
betaemittanzv(j,1), deltabetaemittanzv(j,1),
gammaemittanzv(j,1), deltagammaemittanzv(j,1),
strahltaillv(j,1), minv(j,1),
emittanzv(j,1), deltaemittanzv(j,1));
end
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid, 'Graphik Nr. \t Im Fit nicht beachtete Werte:\n \n');
for j=1:1:zaehler
fprintf(fid, '%.0f \t', j);
for j2=1:1:delmax
fprintf(fid, '%0.4f \t', loesch(j,j2));
end
fprintf(fid, '\n');
end
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid, 'kQD1=%0.4f \t Winkel des MB2=%0.4f \t
Radius des MB2=%0.4f \t Winkel des MB1=%0.4f \t
Radius des MB1=%0.4f \t Winkel des SSH2=%0.4f \t
```



```

Radius des SSH2=%0.4f \t Energie=%0.4f GeV',
kQD1, phiMB2, R2, phiMB1, R1, phiSSH2, R3, energie);
fprintf(fid, '\n \n');
fprintf(fid, 'm11=%0.4f \t m12=%0.4f \t m21=%0.4f \t m22=%0.4f \t',
m11, m12, m21, m22);
fprintf(fid, '\n \n');
fprintf(fid, 'D_0=%0.4f m\t Fehler von D_0=%0.4f m\t D_Ostrich=%0.4f \t
Fehler von D_Ostrich=%0.4f \t', D_0, deltaD_0, D_Ostrich, deltaD_Ostrich);
fclose(fid);

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz;

end

```

### C.2.3 Unterprogramm Sextupolstärke

```

%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
% x Sextupolstaerke x
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

%Eingabe der Sextupolstaerke
mbegin=input('Eingabe der kleinsten Sextupolstaerke:');
mend=input('Eingabe der groessten Sextupolstaerke:');

while(mbegin>mend)
    fprintf('Die eingegebenen Sextupolstaerken sind ungueltig.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    mbegin=input('Eingabe der kleinsten Sextupolstaerke:');
    mend=input('Eingabe der groessten Sextupolstaerke:');
end

mstep=input('Eingabe der Schrittweite:');

while(mstep==0)
    fprintf('Die Schrittweite kann nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    mstep=input('Eingabe der Schrittweite:');
end

%Eingabe der Quadrupolstaerken
kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
while (kebegin==0)
    fprintf('Die eingegebene Quadrupolstaerke darf nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
end
keend=input('Eingabe der groessten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');

while(kebegin>keend)
    fprintf('Die eingegebenen Quadrupolstaerken sind ungueltig.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
while (kebegin==0)
fprintf('Die eingegebene Quadrupolstaerke darf nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kebegin=input('Eingabe der kleinsten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
end
keend=input('Eingabe der groessten Quadrupolstaerke in 1/m^2: ');
end

kestep=input('Eingabe der Schrittweite: ');

while(kestep==0)
    fprintf('Die Schrittweite kann nicht Null sein.
    \nBitte neue Eingabe machen: \n')
    kestep=input('Eingabe der Schrittweite: ');
end

%Preallocating der Matrizen

```

```
F=zeros((round((mend-mbegin)/mstep)+1)*(round((keend-kebegin)/kestep)+1),10);
G=zeros((round((keend-kebegin)/kestep)+1),1);
```

```
%Variation der Sextupolstaerke in for-Schleife
for i=mbegin:mstep:mend
```

```
    %Löschen im Kontrollsystem
    ccs_put('ELS_MAGNETE_BRIDGE.SELECT_DC',0);
    ENERGY =ccs_get('ELS_MAGNETE_DIPOL.ENERGIE_AC');
    ENERGY=ENERGY+0.001;
    pause(1);
    ccs_put('ELS_MAGNETE_DIPOL.ENERGIE_AC',ENERGY);
    pause(1);
```

```
    %Einstellung der Sextupolstaerke
    ccs_put('ELS_ENERGY_MODEL.MXEX_AC',i);
    fprintf('    ... eingestellte Sextupolstaerke: %f \n', i);
```

```
    %Rampen neu setzen
    ccs_put('ELS_ENERGY_MODEL.COMMAND_DC', 20);
    pause(30);
    status=ccs_string_get('ELS_ENERGY_MODEL.STATUS_SM');
    j=0;
    while j==0
        status2=strncmp(status, 'Rampen berechnet und gesetzt. ');
        if status2==1
            j=1;
        else
            status3=strncmp(status, 'Berechne Rampen... ');
            if status3==1
                pause(5);
                j=0;
            else
                status4=strncmp(status, 'Fehler beim Laden',17);
                if status4==1
                    ccs_put('ELS_ENERGY_MODEL.COMMAND_DC', 20);
                    pause(30);
                    status=ccs_string_get('ELS_ENERGY_MODEL.STATUS_SM');
                    j=0;
                else
                    fprintf('Es liegt ein größeres Problem vor.
                    \nBitte Fehler beseitigen.\n')
                    error(' ');
                end
            end
        end
    end
end
```

```
pause(30);
```

```
%Anzahl der Schleifendurchläufe
index3=round((i-mbegin)/mstep)+1;
```

```
    Quadrupolschleife;
```

Hier beginnt das Unterprogramm Quadrupolschleife (vgl. Kapitel C.2.4).

```
%Definition der zu plottenden Parameter
quadrupolstaerke=F(laufindex2-a+1:laufindex2,2);
sigmaemittanz2=F(laufindex2-a+1:laufindex2,9);
deltasigmaemittanz2=F(laufindex2-a+1:laufindex2,10);
del=0;
```

```
%Zeilen mit negativen Emittanzen werden gelöscht
laenge=size(quadrupolstaerke,1);
```

```
for j=laenge:-1:1
    if sigmaemittanz2(j,1)<0
        del=del+1;
```

```

        loesch(1,del)=quadrupolstaerke(j,1);
        quadrupolstaerke(j,:)=[];
        sigmaemittanz2(j,:)=[];
        deltasigmaemittanz2(j,:)=[];
    end
end

laenge2=size(quadrupolstaerke,1)

%Neue Definition der Parameter zum mehrfachen Schleifendurchlauf
quadrupolstaerkeoriginal=quadrupolstaerke;
sigmaemittanz2original=sigmaemittanz2;
deltasigmaemittanz2original=deltasigmaemittanz2;
deloriginal=del;

%Daten fuer Fit in Datei schreiben
fid=fopen('Zwischenspeicher1.txt', 'w');
for j=laufindex2-a+1:1:laenge2
    fprintf(fid, '%f \t %f \t %f \n', quadrupolstaerke(j,1),
        sigmaemittanz2(j,1), deltasigmaemittanz2(j,1));
end
fclose(fid);

Fit;

```

Hier beginnt das Unterprogramm Fit (vgl. Kapitel C.2.5).

```

%Umbenennung der auszugebenden Parameter
alphaemittanzv(1,1)=alphaemittanz*10^6;
betaemittanzv(1,1)=betaemittanz*10^6;
gammaemittanzv(1,1)=gammaemittanz*10^6;
deltaalphaemittanzv(1,1)=deltaalphaemittanz*10^6;
deltabetaemittanzv(1,1)=deltabetaemittanz*10^6;
deltagammaemittanzv(1,1)=deltagammaemittanz*10^6;
strahltaillv(1,1)=strahltaille*10^6;
emittanzv(1,1)=emittanz*10^6;
deltaemittanzv(1,1)=deltaemittanz*10^6;
minv(1,1)=min;

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz/Werte;
%Erstellen des Graphs Strahlbreite vs Quadrupolstärke
fig=figure(index3)
errorbar(F(laufindex2-a+1:laufindex2,2),
F(laufindex2-a+1:laufindex2,9),
F(laufindex2-a+1:laufindex2,10),'x')
hold on;
plot(w,funktionemittanz)
title(strcat('Emittanz bei mx=',num2str(i)))
xlabel('Quadrupolstaerke des QF1 / 1/m^2')
ylabel('Strahlbreite^2 / m^2')
gtext(strcat('Emittanz=',num2str(emittanz),
+/-',num2str(deltaemittanz)));
bild=input('Eingabe des Namen der Graphik zur
Speicherung (ohne Endung):','s');
saveas(gcf,bild,'eps');
hold off;

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz;

%Schleife zur Neuerstellung weiterer Fits mit weniger
%Werten in Abhängigkeit der zugehörigen Fehler
zaehler=1;
j=0;
delmax=0;
while j==0
    if del>delmax;
        delmax=del;
    end
end

```

```

quadrupolstaerke=quadrupolstaerkeoriginal;
sigmaemittanz2=sigmaemittanz2original;
deltasigmaemittanz2=deltasigmaemittanz2original;
del=deloriginal;

%Abfrage ob ein weiterer Fit erstellt werden soll
decide=input('\n Ist der Fit an die Werte zufriedenstellend?:
(Y/N)', 's');
decide_upper=upper(decide);
switch decide_upper
    case 'N'
        CaseN;

```

Hier beginnt das Unterprogramm CaseN (vgl. Kapitel C.2.6).

```

    cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz/Werte;
    %Erstellen des Graphs Strahlbreite vs Quadrupolstärke
    fig=figure(index3)
    errorbar(F(laufindex2-a+1:laufindex2,2),
             F(laufindex2-a+1:laufindex2,9),
             F(laufindex2-a+1:laufindex2,10), 'x')
    hold on;
    plot(w,funktionemittanz)
    title(strcat('Emittanz bei mx=', num2str(i)))
    xlabel('Quadrupolstaerke des QF1 in 1/m^2')
    ylabel('Strahlbreite^2 in m^2')
    gtext(strcat('Emittanz=', num2str(emittanz),
                +/-' , num2str(deltaemittanz)));
    bild=input('Eingabe des Namen der Graphik zur Speicherung
(ohne Endung):', 's');
    saveas(gcf,bild,'eps');
    hold off;

    cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz;
    j=0;

    case 'Y'
        j=1;

    otherwise
        fprintf('\n Das war ein ungueltiges Zeichen. ');
        j=0;

    end
end
%Schleife zur Ausgabe der geloeschten Werte
for ls=2:1:zaehler
    for lss=1:1:deloriginal
        loesch(ls,lss)=loesch(1,lss);
    end
end

%Speichern der Daten
name=input('Eingabe des Namen der txt-Datei zur Speicherung der Daten
(.txt nicht vergessen!):', 's');

    cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz/Werte;

fid=fopen(name, 'w');
fprintf(fid, 'Der Arbeitspunkt betraegt: %0.4f', i);
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid, 'k in 1/m^2 \t Strahlbreite x in mm \t delta x in mm \t
Sigma Emittanz *10^6 \t delta sigma Emittanz *10^6 \n \n');
for j=1:1:index4
    fprintf(fid, '%0.4f \t %0.4f \t %0.4f \t %0.4f \t %0.4f \n',
           G(j,1), G(j,2), G(j,3), G(j,4), G(j,5));
end
fprintf(fid, '\n \n \n');

```

```

fprintf(fid,'Graphik Nr. \t alpha*Emittanz *10^6 \t
Fehler von alpha*Emittanz *10^6 \t beta*Emittanz *10^6 \t
Fehler von beta*Emittanz *10^6 \t gamma*Emittanz *10^6 \t
Fehler von gamma*Emittanz *10^6 \t Strahltaille *10^6 \t
Quadrupolstaerke in der Strahltaille\t Emittanz *10^6 \t
Fehler der Emittanz *10^6 \n \n');
for j=1:1:zaehler
    fprintf(fid, '%.0f \t%.04f \t %.04f \t %.04f \t
%.04f \t %.04f \t %.04f \t %.04f \t %.04f \t%.04f \n',
j, alphaemittanzv(j,1), deltaalphaemittanzv(j,1),
betaemittanzv(j,1), deltabetaemittanzv(j,1),
gammaemittanzv(j,1), deltagammaemittanzv(j,1),
strahltaillv(j,1), minv(j,1),
emittanzv(j,1), deltaemittanzv(j,1));
end
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid, 'Graphik Nr. \t Im Fit nicht beachtete Werte:\n \n');
for j=1:1:zaehler
    fprintf(fid, '%.0f \t', j);
    for j2=1:1:delmax
        fprintf(fid, '%0.4f \t', loesch(j,j2));
    end
    fprintf(fid, '\n');
end
fprintf(fid, '\n \n \n');
fprintf(fid, 'kQD1=%0.4f \t Winkel des MB2=%0.4f \t
Radius des MB2=%0.4f \t Winkel des MB1=%0.4f \t
Radius des MB1=%0.4f \t kQD1=%0.4f \t
Winkel des SSH2=%0.4f \t Radius des SSH2=%0.4f \t',
kQD1, phiMB2, R2, phiMB1, R1, phiSSH2, R3);
fprintf(fid, '\n \n');
fprintf(fid, 'm11=%0.4f \t m12=%0.4f \t m21=%0.4f \t m22=%0.4f \t',
m11, m12, m21, m22);
fprintf(fid, '\n \n');
fprintf(fid, 'D_0=%0.4f m\t Fehler von D_0=%0.4f m\t
D_Ostrich=%0.4f \t Fehler von D_Ostrich=%0.4f \t',
D_0, deltaD_0, D_Ostrich, deltaD_Ostrich);
fclose(fid);

cd /sgt/elsa/matlab/emittanz_extr/Emittanz;

end

```

## C.2.4 Unterprogramm Quadrupolschleife

```

%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
%x Quadrupolschleife x
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

%Variation der Quadrupolstaerke in for-Schleife
for j=kebegin:kestep:keend

    %Einstellung der Quadrupolstaerke
    energie=ccs_get('ELS_ENERGY_MODEL.EXTENERGY_AC');
    strom=0.025^2*energie/(2*0.2998*4*3.1416*10^-7*11)*j;
    ccs_put('EXT_MAGNETE_QF1.STROM_AC',strom);
    fprintf(' ... eingestellte Quadrupolstaerke des QF1:
%f 1/m^2\n', j);
    ccs_wait_get('EXT_FGRABBER2_CTRL.CYCLE_DM',0);

    %Anzahl der Schleifendurchläufe
    index4 = round((j-kebegin)/kestep+1);
    %Zuordnung der Spalten der Matrix
    laufindex2=(index3-1)*a+index4;

    %Befüllung der Matrix mit variablen Parameter, Quadrupolstaerke
    F(laufindex2,1)=i;
    F(laufindex2,2)=j;

```

```

%Einlesen der Strahlbreite
for kp=1:1:4
    ccs_wait_get('EXT_FGRABBER2_CTRL.CYCLE_DM',0);
    E(kp,1)=ccs_get('EXT_FGRABBER2_BPOS.WIDTHX_AD')
end
breite=(E(1,1)+E(2,1)+E(3,1)+E(4,1))/4;
breitem=breite*0.001;
F(laufindex2,3)=breitem;
F(laufindex2,4)=(breitem)^2;

%Berechnung Fehler der Strahlbreite in m
sum=0;
for lp=1:1:4
    sum=sum+(E(lp,1)-breite)^2
end
deltabreite=sqrt(0.25*(sum));
deltabreitem=deltabreite*0.001;
F(laufindex2,5)=deltabreitem;

%Berechnung von D(k)
F(laufindex2,6)=D_0*(m11*cos(1*sqrt(j))-m12*sqrt(j)*sin(sqrt(j)*1))
+D_Ostrich*(m11/sqrt(j)*sin(sqrt(j)*1)+m12*cos(sqrt(j)*1));
F6=D_0*(m11*cos(1*sqrt(j))-m12*sqrt(j)*sin(sqrt(j)*1))
+D_Ostrich*(m11/sqrt(j)*sin(sqrt(j)*1)+m12*cos(sqrt(j)*1));
F(laufindex2,7)=(F6*0.00059)^2;
F7=(F6*0.00059)^2;

%Berechnung der Fehler von D(k)
F(laufindex2,8)=sqrt(((m11*cos(1*sqrt(j))
-m12*sqrt(j)*sin(sqrt(j)*1))*deltaD_0)^2
+((m11/sqrt(j)*sin(sqrt(j)*1)
+m12*cos(sqrt(j)*1))*deltaD_Ostrich)^2);
F8=sqrt(((m11*cos(1*sqrt(j))
-m12*sqrt(j)*sin(sqrt(j)*1))*deltaD_0)^2
+((m11/sqrt(j)*sin(sqrt(j)*1)
+m12*cos(sqrt(j)*1))*deltaD_Ostrich)^2);

%Berechnung von epsilon*beta
F(laufindex2,9)=((breitem)^2-((F6)*0.00059)^2);

%Berechnung des Fehlers von epsilon*beta
F(laufindex2,10)=sqrt((2*breitem*deltabreitem)^2
+(2*F8*F6*0.00059^2)^2);

%Befüllung der Matrix G in lesbaren Einheiten
G(index4,1)=j;
G(index4,2)=breite;
G(index4,3)=deltabreite;
G(index4,4)=((breitem)^2-((F6)*0.00059)^2)*10^6;
%epsilon*beta
G(index4,5)=sqrt((2*breitem*deltabreitem)^2
+(2*F8*F6*0.00059^2)^2)*10^6;

end

%Schleifendurchläufe der Quadrupolschleife
a=index4;

```

### C.2.5 Unterprogramm Fit

```

%xxxxxxx
%x Fit x
%xxxxxxx

%Parameter fuer Fit in Datei schreiben
fid=fopen('Zwischenspeicher.txt', 'w');
fprintf(fid, 'm(x)=%f \n', m11);
fprintf(fid, 'n(x)=%f \n', m12);
fclose(fid);

```

```

%Gnuplotscript in Datei schreiben
fid = fopen('Gnuplotskript.txt', 'w');
gp='load "Zwischenspeicher.txt"';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='p(x)=m(x)*cos(0.4749*sqrt(x))
-n(x)*sqrt(x)*sin(0.4749*sqrt(x))';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='q(x)=m(x)/sqrt(x)*sin(0.4749*sqrt(x))
+n(x)*cos(0.4749*sqrt(x))';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='f(x)=b*p(x)**2-2*p(x)*q(x)*a+q(x)**2*c';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='set fit errorvariables';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp='fit f(x) "Zwischenspeicher1.txt" using 1:2:3 via a,b,c';
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp = 'set print "temp.txt" ;
fprintf(fid, '%s\n', gp);
gp = 'print a, a_err, b, b_err, c, c_err' ;
fprintf(fid, '%s\n', gp);
fclose(fid);

%Gnuplotscript durchfuehren
eval(['!gnuplot ', 'Gnuplotskript.txt']);

%Errechnete Werte an Matlab uebergeben
load temp.txt
temp;

alphaemittanz=temp(1,1); betaemittanz=temp(1,3);
gammaemittanz=temp(1,5); deltaalphaemittanz=temp(1,2);
deltabetaemittanz=temp(1,4); deltagammaemittanz=temp(1,6);

%Bestimmung des Minimums und Berechnung der Emittanz
fun3=inline(sprintf('%d*(%d.^2.*(cos(%d.*k.^(1./2))).*
(cos(%d.*k.^(1./2)))+%d.^2.*k.*(sin(%d.*k.^(1./2))).*
(sin(%d.*k.^(1./2)))-2.*%d.*%d.*k.^(1./2).*sin(%d.*k.^(1./2)).*
*cos(%d.*k.^(1./2)))-%d.*(2.*( %d.*cos(%d.*k.^(1./2)))-%d.
*k.^(1./2).*sin(%d.*k.^(1./2))).*(%d.*1./(k.^(1./2))).
*sin(%d.*k.^(1./2))+%d.*cos(%d.*k.^(1./2)))+%d.*
(%d.^2.*1./k.*(sin(%d.*k.^(1./2))).*(sin(%d.*k.^(1./2)))
+%d.^2.*(cos(%d.*k.^(1./2))).*(cos(%d.*k.^(1./2)))+2.*%d.
*%d.*1./(k.^(1./2))).*sin(%d.*k.^(1./2)).*cos(%d.*k.^(1./2)))
',betaemittanz, m11, 1, 1, m12, 1, 1, m11, m12, 1, 1,
alphaemittanz, m11, 1, m12, 1, m11, 1, m12, 1, gammaemittanz,
m11, 1, 1, m12, 1, 1, m11, m12, 1, 1));
min=fminbnd(fun3,kebegin,keend)

strahltaille=betaemittanz*(m11.^2.*(cos(1.*min.^(1./2))).
*(cos(1.*min.^(1./2)))+m12.^2.*min.*(sin(1.*min.^(1./2))).
*(sin(1.*min.^(1./2)))-2.*m11.*m12.*min.^(1./2).
*sin(1.*min.^(1./2)).*cos(1.*min.^(1./2)))-alphaemittanz.
*(2.*(m11.*cos(1.*min.^(1./2))-m12.*min.^(1./2).
*sin(1.*min.^(1./2))).*(m11.*1./(min.^(1./2)).
*sin(1.*min.^(1./2))+m12.*cos(1.*min.^(1./2)))+gammaemittanz.*
(m11.^2.*1./min.*(sin(1.*min.^(1./2))).*(sin(1.*min.^(1./2)))
+m12.^2.*(cos(1.*min.^(1./2))).*(cos(1.*min.^(1./2)))+2.*m11.
*m12.*1./(min.^(1./2)).*sin(1.*min.^(1./2)).*cos(1.*min.^(1./2)));

emittanz=(strahltaille.*(m21.*cos(1.*min.^(1./2))
-m22.*min.^(1./2)*sin(1.*min.^(1./2)))^2.*betaemittanz-2.*
(m21.*cos(1.*min.^(1./2))-m22.*min.^(1./2)*sin(1.*min.^(1./2)))
*(m21./(min.^(1./2))*sin(1.*min.^(1./2))+m22.*cos(1.*min.^(1./2)))
*alphaemittanz+(m21./(min.^(1./2))*sin(1.*min.^(1./2))
+m22.*cos(1.*min.^(1./2)))^2.*gammaemittanz).^2);

%Berechnung des Fehlers der Emittanz
deltaemittanz2=((strahltaille.*(m21.*cos(1.*min.^(1./2))-m22.
*min.^(1./2)*sin(1.*min.^(1./2)))^2.*deltabetaemittanz).^2

```

```

+(2.*strahltaille.*(m21.*cos(1.*min.^(1./2))-m22.*min.^(1./2)
*sin(1.*min.^(1./2)))*(m21./(min.^(1./2))*sin(1.*min.^(1./2))
+m22.*cos(1.*min.^(1./2)))*deltaalphaemittanz.^2+(strahltaille.
*(m21./(min.^(1./2))*sin(1.*min.^(1./2))+m22.
*cos(1.*min.^(1./2)))^2.*deltagammaemittanz).^2).^^(1./2);
deltaemittanz=deltaemittanz2./(emittanz.*2);

%Definition von Variablen und Funktion zum plotten
xbegin=kebegin-2*kestep;
xend=keend+2*kestep;
w=xbegin:0.01:xend;
funktionemittanz=betaemittanz.*(m11.^2.*(cos(1.*w.^(1./2))).
*(cos(1.*w.^(1./2)))+m12.^2.*w.*(sin(1.*w.^(1./2))).
*(sin(1.*w.^(1./2)))-2.*m11.*m12.*w.^(1./2).*sin(1.*w.^(1./2)).
*cos(1.*w.^(1./2))-alphaemittanz.*(2.*(m11.*cos(1.*w.^(1./2))
-m12.*w.^(1./2).*sin(1.*w.^(1./2))).*(m11.*1./(w.^(1./2)).
*sin(1.*w.^(1./2))+m12.*cos(1.*w.^(1./2))))+gammaemittanz.
*(m11.^2.*1./w.*(sin(1.*w.^(1./2))).*(sin(1.*w.^(1./2)))
+m12.^2.*(cos(1.*w.^(1./2))).*(cos(1.*w.^(1./2))))+2.
*m11.*m12.*1./(w.^(1./2)).*sin(1.*w.^(1./2)).*cos(1.*w.^(1./2)));

```

## C.2.6 Unterprogramm CaseN

```

%xxxxxxxxxxxxx
% x CaseN x
%xxxxxxxxxxxxx
zaehler=zaehler+1;
k=0;
laenge3=laenge2;

%Schleife zum Loeschen von Werten fuer verschiedene Graphen
while k==0
    loeschwert=input('\nBitte die Quadrupolstaerke
    des zu loeschenden Werts eingeben:');

    %Oben eingegebener Wert wird in Schleife gesucht und geloescht
    for j=laenge2:-1:1
        if (loeschwert< quadrupolstaerke(j,1)*1.00001 &
            loeschwert> quadrupolstaerke(j,1)*0.99999)
            del=del+1;
            loesch(zaelher,del)=quadrupolstaerke(j,1);
            quadrupolstaerke(j,:)=[];
            sigmaemittanz2(j,:)=[];
            deltasigmaemittanz2(j,:)=[];
        end
    end

    %Ueberpruefung ob ein Wert geloescht wurde
    laenge3=size(quadrupolstaerke,1);
    if(laenge3==laenge2)
        fprintf('Der eingegebenen Wert ist ungueltig.
        \nEntweder wurde dieser Wert schon geloescht oder er existiert nicht.
        \nBitte neue Eingabe machen: \n')
        k=0;
    else
        k=1;
        z=0;
        count=1;
        laengex(count,1)=laenge3;

        %Abfrage ob weitere Werte geloescht werden sollen
        while z==0
            decide2=input('\n Soll ein weiterer Wert geloescht werden?:
            (Y/N)', 's');
            decide2_upper=upper(decide2);
            switch decide2_upper
                case 'N'
                    z=1;

                case 'Y'

```



```

z2=0;
while z2==0
    loeschwert=input('\nBitte die Quadrupolstaerke
        des zu loeschenden Werts eingeben:');

    %Oben eingegebener Wert wird in Schleife gesucht und geloesch
    for j=laengex(count,1):-1:1
        if (loeschwert< quadrupolstaerke(j,1)*1.00001 &
            loeschwert> quadrupolstaerke(j,1)*0.99999)
            del=del+1;
            loesch(zaehler,del)=quadrupolstaerke(j,1);
            quadrupolstaerke(j,:)=[];
            sigmaemittanz2(j,:)=[];
            deltasigmaemittanz2(j,:)=[];
        end
    end

    %Ueberpruefung ob ein Wert geloesch wurde
    count=count+1;
    laengex(count,1)=size(quadrupolstaerke,1);
    if laengex(count,1)~=laengex(count-1,1)
        fprintf('Der eingegebenen Wert ist ungueltig.
            \nEntweder wurde dieser Wert schon geloesch oder er existiert nicht.
            \nBitte neue Eingabe machen: \n')
        z2=0;
    else
        z2=1;
        z=0;
    end
end

otherwise
fprintf('\n Das war ein ungueltiges Zeichen. ');
z=0;
end

end
end
end

%Daten fuer Fit in Datei schreiben
fid=fopen('daten.txt', 'w');
for j=laufindex2-a+1:1:laengex(count,1)
    fprintf(fid, '%0.4f \t %0.10f \t %0.10f \n', quadrupolstaerke(j,1),
        sigmaemittanz2(j,1), deltasigmaemittanz2(j,1));
end
fclose(fid);

Fit;

```

Hier beginnt das Unterprogramm Fit (vgl. Kapitel C.2.5).

```

%Umbenennung der auszugebenden Parameter
alphaemittanzv(zaehler,1)=alphaemittanz*10^6;
betaemittanzv(zaehler,1)=betaemittanz*10^6;
gammaemittanzv(zaehler,1)=gammaemittanz*10^6;
deltaalphaemittanzv(zaehler,1)=deltaalphaemittanz*10^6;
deltabetaemittanzv(zaehler,1)=deltabetaemittanz*10^6;
deltagammaemittanzv(zaehler,1)=deltagammaemittanz*10^6;
strahltailllev(zaehler,1)=strahltaille*10^6;
emittanzv(zaehler,1)=emittanz*10^6;
deltaemittanzv(zaehler,1)=deltaemittanz*10^6;
minv(zaehler,1)=min;

```