



# Bachelorarbeit in Physik

von  
David Waldemar Maluski

angefertigt am  
Physikalischen Institut der Universität Bonn

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

Juli 2013

- Thema:** Magnetfeldvermessung eines Korrektormagneten für ELSA
- 1. Gutachter:** Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Hillert
- 2. Gutachter:** Prof. Jochen Dingfelder



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1. Die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA . . . . .	5
1.2. Grundlagen . . . . .	6
1.2.1. Koordinatensystem . . . . .	6
1.2.2. Gleichgewichtsbahn . . . . .	6
1.2.3. Korrektur der Gleichgewichtsbahn durch Dipolmagnete . . . . .	7
1.3. Korrektormagnet für die vertikale Lagekorrektur . . . . .	8
1.3.1. Einfluss der Temperatur auf das Magnetfeld . . . . .	9
1.3.2. Reaktionszeit des Magneten . . . . .	10
<b>2. Messaufbau</b>	<b>11</b>
2.1. Beschreibung . . . . .	11
2.2. Messfehler . . . . .	13
2.2.1. Position . . . . .	13
2.2.2. Stromquelle . . . . .	14
2.2.3. Hall-Sonde . . . . .	15
2.2.4. Störfelder . . . . .	16
<b>3. Durchführung</b>	<b>17</b>
3.1. Vorüberlegung . . . . .	17
3.1.1. Sättigung des Magneten . . . . .	18
3.1.2. Filterkonstante der Hall-Sonde . . . . .	19
3.2. Messung . . . . .	20
<b>4. Auswertung</b>	<b>21</b>
4.1. Verlauf der Magnetfeld-Komponenten . . . . .	21
4.2. Integrierte Feldstärke $IFS_{B_{\perp}}$ . . . . .	23
4.3. Ablenkwinkel $\alpha$ . . . . .	31
<b>5. Fazit</b>	<b>35</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>37</b>
A.1. Tabellen . . . . .	37
A.2. Bilder . . . . .	38
Literaturverzeichnis . . . . .	44



# 1. Einleitung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird das Magnetfeld eines neuen Magnettypen, der für die Korrektur der vertikalen Gleichgewichtsbahn an der Elektronen-Stretcher-Anlage (ELSA) der Universität Bonn eingesetzt wird, vermessen. Dazu wird ausgehend von einer bereits vorliegenden Apparatur, die im Rahmen der Diplomarbeit [Bal03] von Andreas Balling entwickelt wurde, ein neuer Messaufbau entworfen, der es ermöglicht, das Magnetfeld orts aufgelöst in Abhängigkeit des durch die Spule des Magneten fließenden Stroms zu messen. Als Ergebnis dieser Arbeit soll eine möglichst präzise Angabe der integrierten Feldstärke der neuen Korrektormagnete vorliegen.

## 1.1. Die Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA

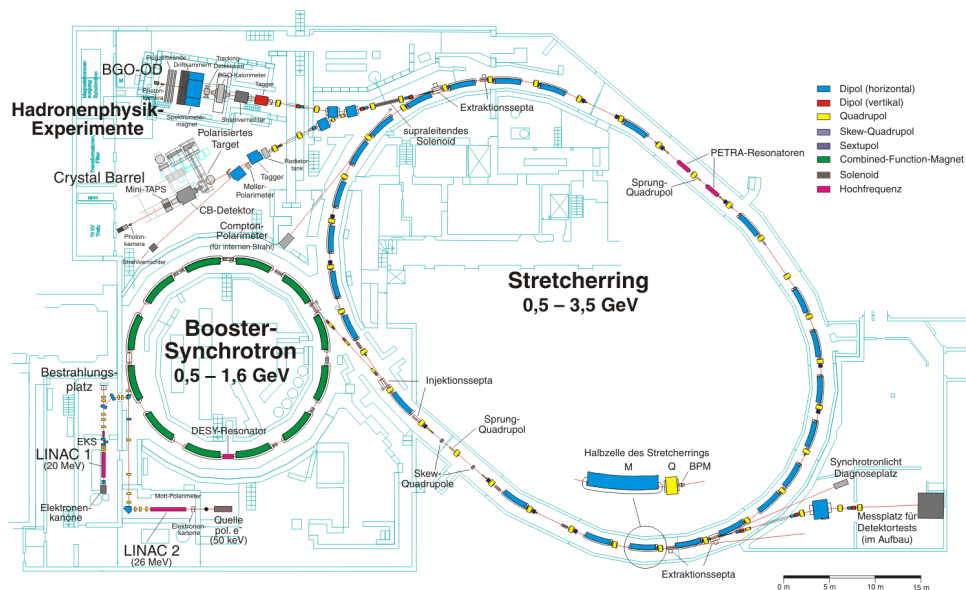


Abbildung 1.1.: Die Elektronen-Stretcher-Anlage mit den aktuellen Experimenten im Überblick [ELS].

Die Teilchenbeschleunigeranlage ELSA der Universität Bonn (siehe Abbildung 1.1) besteht aus drei Stufen. Bei der ersten Stufe wird man sich in Zukunft zwischen dem Linearbeschleuniger LINAC1, der Elektronen mit 20 MeV, und dem LINAC2, der Elektronen mit 26 MeV in den Kreisbeschleuniger injiziert, entscheiden können. Die Elektronen für den LINAC2 werden aus Quellen, die polarisierte und unpolarisierte Elektronen erzeugen können, entnommen. Die Elektronen werden dann in der zweiten Stufe, im sogenannten

Booster-Synchrotron auf eine Energie zwischen 0,5 GeV und 1,6 GeV beschleunigt und werden anschließend in die dritte und letzte Stufe, den Stretcherring, injiziert [ELS]. Dort wird der Strahl auf maximal 3,2 GeV beschleunigt und dann wahlweise zu einem der beiden Experimente (Crystal Barrel oder BGO-OD) extrahiert. Der Strahl kann dort über eine Zeit von einigen Sekunden eine konstante Intensität von mehreren 100 pA liefern [Thi11].

## 1.2. Grundlagen

Um eine möglichst gleichbleibende Strahlqualität (Lebensdauer, hohe und konstante Stromstärke) für die Experimente gewährleisten zu können, ist es notwendig die Teilchenbahn im Hinblick auf ihre Lage zu optimieren [Kei00]. Große Abweichungen von der gewünschten Teilchenbahn können dazu führen, dass Teilchen verloren gehen und die Lebensdauer abnimmt. Um dies zu verhindern, ist ein System zur Korrektur eingebaut, welches die Strahlbahn in Richtung der gewünschten Teilchenbahn korrigiert. Hierzu ist es notwendig den verwendeten Magneten auf seine Eigenschaften zu untersuchen.

### 1.2.1. Koordinatensystem

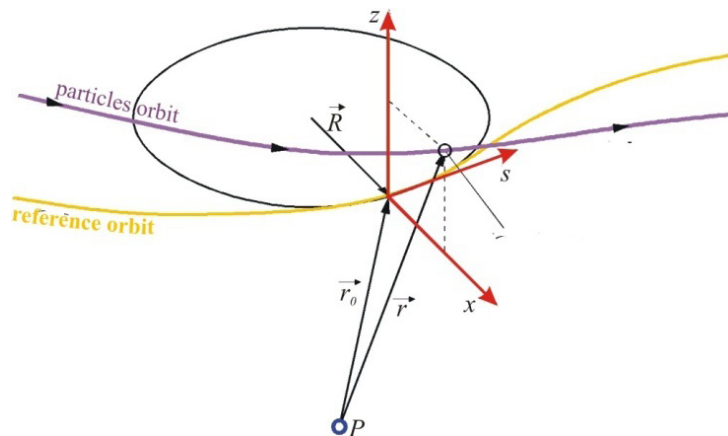


Abbildung 1.2.: Das Koordinatensystem einer Teilchenbahn (particles orbit) im Bezug auf den Sollorbit (reference orbit) [K.W96]

Die Teilchenbahn wird durch ein, sich mit dem Teilchen mitbewegendes, kartesisches Koordinatensystem beschrieben. Wie in Abbildung 1.2 zu sehen, werden die transversalen Komponenten durch die x- und z-Koordinaten und die Longitudinale durch die s-Koordinate dargestellt. Dieses Koordinatensystem wird in dieser Arbeit auch für die vermessenen Magnetfelder verwendet.

### 1.2.2. Gleichgewichtsbahn

Aus den Hill'schen Bewegungsgleichungen berechnen sich die Umlaufbahnen der Elektronen durch den Beschleuniger [K.W96]. Idealerweise geht der Sollorbit durch die Mitte

der Quadrupole, da an diesen Stellen die Quadrupole fokussieren ohne den Strahl zusätzlich abzulenken. Es stellen sich abhängig vom Aufbau der Magnete des Beschleunigers geschlossene und stabile Gleichgewichtsbahnen ein. Diese *closed orbits* weichen durch Positionierungsfehler oder Feldfehler der Magnete jedoch vom Sollorbit ab. Die Fehler in der Positionierung und den Feldern der Magnete lassen sich nicht vollständig korrigieren. Daher wird eine zusätzliche Korrektur des closed orbits nötig. Diese kann mithilfe des so genannten Korrektorsystems, welches aus zusätzlichen Dipolmagneten besteht, die den Strahl wieder zum Sollorbit hin lenken, realisiert werden.

### 1.2.3. Korrektur der Gleichgewichtsbahn durch Dipolmagnete

Die Bewegung der Teilchen kann mit Hilfe einer Betrachtung der einwirkenden Kräfte verstanden werden. Um Teilchen auf einer Kreisbahn beschleunigen zu können, müssen diese mit Hilfe elektromagnetischer Felder auf diese abgelenkt werden. Auf geladene Teilchen, die sich durch ein elektromagnetisches Feld bewegen, wirkt die Lorentzkraft, die durch die Formel

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.1)$$

beschrieben wird. Dabei sind  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  die elektrischen bzw. magnetischen Felder, die auf das Teilchen wirken,  $q$  die elektrische Ladung (Elementarladung  $e$  für Elektronen) und  $\vec{v}$  der Geschwindigkeitsvektor des Teilchens. Im Falle hochrelativistischer Teilchen, kann  $v \approx c$  angenommen werden ( $\gamma \approx 978$ , für Elektronen mit 0,5 GeV).

Zur Ablenkung werden Magnetfelder benutzt. Damit ist

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = e(\vec{v} \times \vec{B}) . \quad (1.2)$$

Ein Dipolmagnet lenkt ein geladenes Teilchen auf eine Kreisbahn ab. Dabei wird der Radius  $R$  der Ablenkung mit Hilfe der Zentrifugalkraft berechnet. Steht das Magnetfeld  $B_{\perp}$  senkrecht auf der Teilchenbahn, kann die Gleichung 1.1 vereinfacht werden zu:

$$\vec{F}_{\text{Zentrifugal}} = \vec{F}_{\text{Lorentz}} , \quad (1.3)$$

$$\frac{m_e v^2}{R} \gamma \stackrel{\gamma = \frac{E}{E_0}}{=} \frac{m_e v^2}{R} \frac{E}{m_e c^2} \stackrel{v \approx c}{=} \frac{E}{R} = ecB_{\perp} . \quad (1.4)$$

Hierbei ist  $\gamma$  der relativistische Lorentz-Faktor,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $E_0$  und  $E$  die Ruhe- bzw. Gesamtenergie des Teilchens und  $m_e$  die Ruhemasse des Elektrons.

Daraus folgt demnach

$$R = \frac{E}{ecB_{\perp}} \quad (1.5)$$

für den Ablenkradius eines Dipolmagneten [WH].

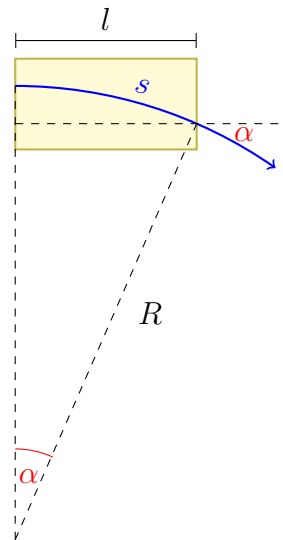


Abbildung 1.3.: Zusammenhang des Ablenkwinkels  $\alpha$  mit dem Ablenkradius  $R$  und der effektiven Feldlänge  $l$  eines Dipolmagneten [Sch12].

Die Korrektormagnete können wie kurze Dipolmagnete aufgefasst werden. Für den Winkel  $\alpha$ , um den ein Teilchen im Magneten abgelenkt wird, und die Feldlänge  $l$  gilt

$$\sin \alpha = \frac{l}{R} \approx \alpha \quad (1.6)$$

und somit

$$R = \frac{l}{\alpha} \quad (1.7)$$

(siehe Abbildung 1.3). Wenn man nun die Gleichung 1.5 für den Ablenkradius von Dipolmagneten einsetzt, erhält man

$$\frac{l}{\alpha} = \frac{E}{ecB_{\perp}} \quad (1.8)$$

und

$$\alpha = \frac{ecB_{\perp}l}{E}. \quad (1.9)$$

Der Ablenkwinkel  $\alpha$  hängt somit von der Energie  $E$  der Teilchen sowie dem Produkt  $B_{\perp}l$  ab. Dieses Produkt wird als integrierte Feldstärke (IFS) bezeichnet. Dieser Faktor kann mit dem Wissen über den Feldverlauf des Magneten bestimmt werden. Dazu muss das senkrecht zur Bewegungsrichtung des Strahls verlaufende Magnetfeld vermessen und entlang der Feldlänge  $l$  integriert werden.

### 1.3. Korrektormagnet für die vertikale Lagekorrektur

Der im Rahmen der Diplomarbeit von Andreas Balling [Bal03] entwickelte Korrektormagnet (siehe Abbildung 1.4) wird an 30 ausgewählten Positionen am Strahlrohr des Stret-



cherrings angebracht. Diese Magnete werden für die Korrektur in der vertikalen Ebene eingesetzt. Es handelt sich um C-förmige Dipolmagnete. Die technischen Daten sind in Tabelle A.1 zusammengefasst (siehe Anhang A.1).

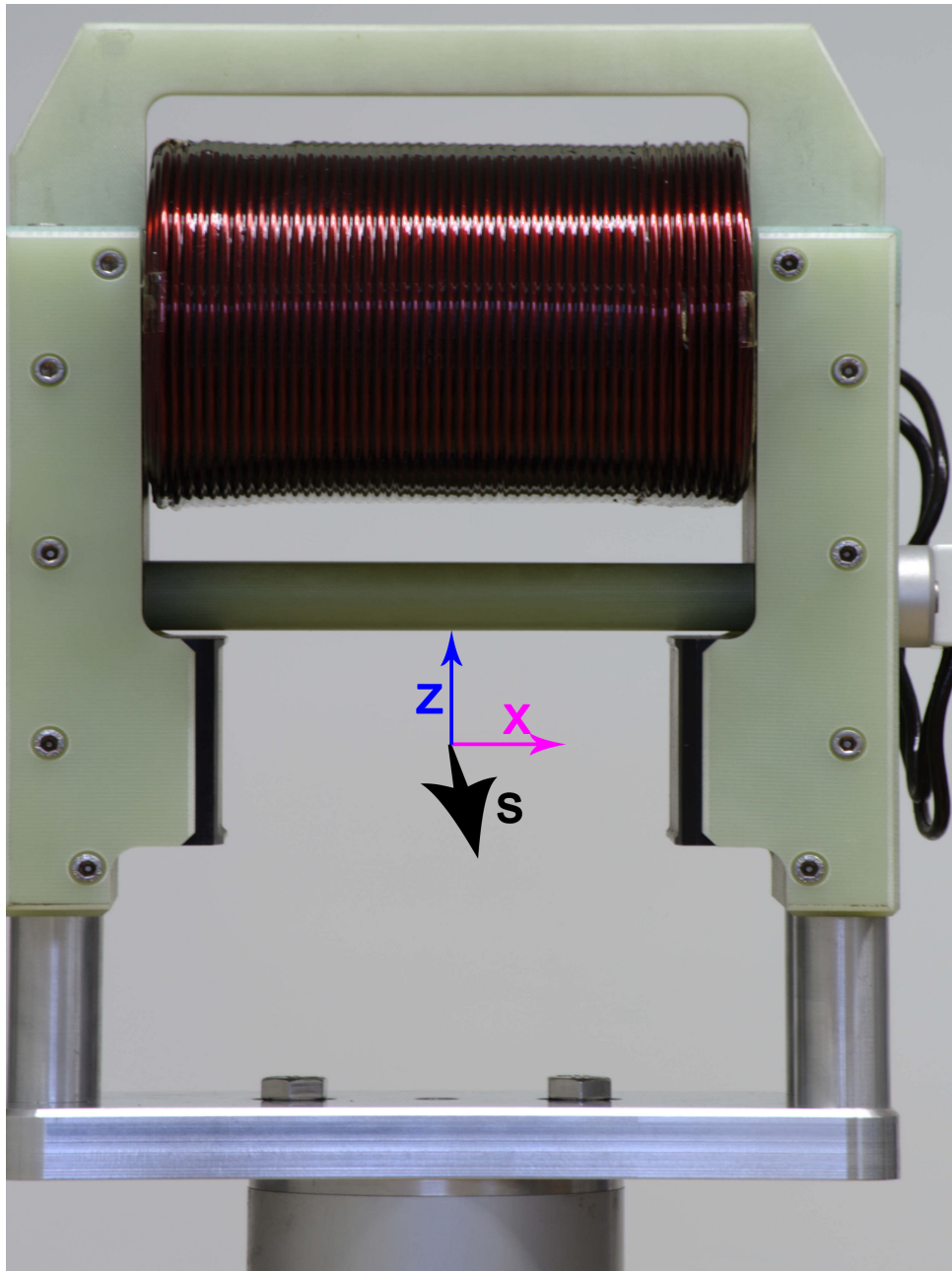


Abbildung 1.4.: Das Bild zeigt einen Korrektor-Magneten. In der Mitte ist das in Abschnitt 1.2.1 definierte Beschleuniger-Koordinatensystem eingezeichnet.

### 1.3.1. Einfluss der Temperatur auf das Magnetfeld

Der Magnet selbst ist ein aus einer Spule und einem Eisenjoch gefertigter Elektromagnet. Der Ohmsche Widerstand der Spule ist temperaturabhängig. Durch fließende Ströme heizt sich der Spulendraht auf. Mit einem höheren Widerstand sinkt die Stromstärke. Um dies

zu verhindern, wird an den Dipolmagneten ein Netzgerät mit einem geregelten und stabilisierten Ausgangsstrom angeschlossen.

### 1.3.2. Reaktionszeit des Magneten

Für den Korrektormagneten, der vermessen werden soll, gilt  $R_L = 0,7 \Omega$  und  $L = 170 \text{ mH}$  (beides bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Dies führt zu einer theoretischen Zeitkonstante von  $\tau = 243 \text{ ms}$  (Tabelle A.1). Allerdings werden die Magnete mit einem gepulsten Netzgerät betrieben und können daher das gewünschte Feld in wenigen ms aufbauen [Bal03].

## 2. Messaufbau

### 2.1. Beschreibung

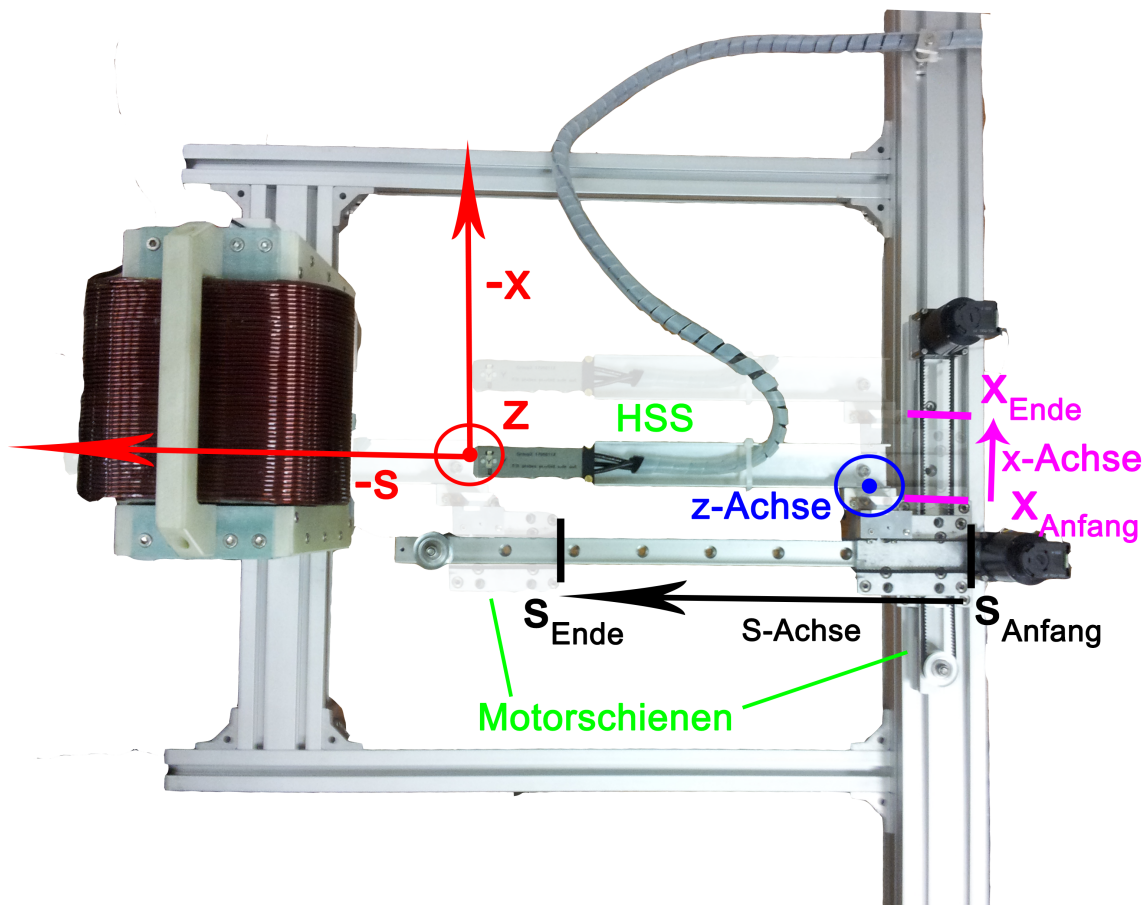


Abbildung 2.1.: Das Bild zeigt den Messaufbau. Zusätzlich wurden die Positionen, die mit den Motoren angefahren werden, und das Koordinatensystem, welches sich daraus ergibt, eingezeichnet.

Der verwendete Messaufbau (siehe Abbildung 2.1) besteht aus zwei Motoren, die eine Hall-Sonden-Halter, auf senkrecht zueinander orientierten Schienen, bewegen. Die Schienen selbst sind auf einem MiniTec-Gerüst montiert, welches, um Positionierungsfehler zu minimieren, auf einer Richtplatte geebnet zusammengebaut wurde. Auf den beiden Motorschienen befinden sich Wagen, die eine Bewegung in x- und s-Richtung erlauben. Auf dem Wagen der ersten Schiene ist die Schiene mit dem zweiten Motor befestigt. Der zweite Wagen trägt die Hall-Sonde. Sie ist an einer weiteren Schiene angebracht, die

über einen mechanischen Drehknopf in der Höhe (z-Achse) verstellt werden kann. Dabei ist die Weglänge, die die Wagen zurücklegen können, lediglich durch die Maße der Motorschienen, der Hall-Sonden-Schiene (HSS) und des Magneten begrenzt. Die Anfangs- und Endpunkte aller Messungen werden auf folgende Begrenzungen gelegt: Auf der s-Achse entspricht der Anfangspunkt  $s_{\text{Anfang}}$  dem Berührungspunkt zwischen dem Wagen, auf dem die Hall-Sonden-Schiene montiert ist, und der Motorbefestigung. Der Endpunkt  $s_{\text{Ende}}$  liegt auf dem Berührungspunkt zwischen dem Wagen und dem auf der Schiene befindlichen Zahnrad. Auf der x-Achse wird die Weglänge durch die Maße des Magneten und die Breite der HSS bestimmt. Der Anfangspunkt  $x_{\text{Anfang}}$  liegt in der oberen linken Ecke des Magneten. Der Endpunkt  $x_{\text{Ende}}$  ist 80 mm vom Anfangspunkt in negativer x-Richtung entfernt. Die vertikale Weglänge ist auf 40 mm beschränkt und wird im Abstand zum MiniTec-Gerüst angegeben (siehe Tabelle 2.1). Die Bewegungen von den Anfangs- zu den Endpunkten entsprechen den gleichen Bewegungen der Hall-Sonde an der Stirnseite. Somit kann das Koordinatensystem an diese gelegt werden. Später können die Werte mit Hilfe der Abmessungen der Hall-Sonde, der HSS und des Magneten in ein Koordinatensystem transformiert werden, welches seinen Ursprung in der Mitte des Magneten hat. Der Ursprung entspricht, bei optimaler Positionierung des Magneten am Strahlrohr, der Strahlachse durch den Magneten.

Parameter	Wert
HSS, Breite $b_{\text{HSS}}$	40 mm
HSS, Höhe $h_{\text{HSS}}$	30 mm
Magnet, Breite $b_{\text{Magnet}}$	120 mm
Magnetbefestigung, Breite $b_{\text{Magnetbef.}}$	250 mm
$x_{\text{Anfang}}$	0 mm
$x_{\text{Ende}}$	-80 mm
$z_{\text{Anfang}}$	122 mm
$z_{\text{Ende}}$	82 mm
$s_{\text{Anfang}}$	0 mm
$s_{\text{Ende}}$	-354 mm

Tabelle 2.1.: In der Tabelle sind die verschiedenen Parameter, die durch den Messaufbau gegeben sind, dargestellt.

Die Ansteuerung der Motoren und das Auslesen der Hall-Sonden-Werte wird über eine serielle Schnittstelle in einem LabView-Programm implementiert [Bal03]. Das Programm wird um eine zusätzliche Funktion erweitert, die es ermöglicht über eine D/A-Karte eine Spannung an das Netzgerät des Magneten zu übermitteln, welche von diesem dann in eine proportionale Stromstärke umgewandelt wird. Das Netzgerät wurde von der ELSA-Arbeitsgruppe entwickelt. Es ist so aufgebaut, dass eine Spannung als Soll-Wert angegeben werden kann und dieser in eine proportionale Stromstärke umgewandelt wird. Der Ausgang wird geregelt und stabilisiert [Die]. Die benutzte D/A-Karte ist eine ME-4660 des Herstellers Meilhaus. Somit kann mit dem Aufbau das Magnetfeld abhängig von der lon-

gitudinalen und transversalen Position sowie der am Magneten anliegenden Stromstärke vermessen werden.

## 2.2. Messfehler

### 2.2.1. Position

Die Ebenen aller zu montierenden Teile werden jeweils mit Hilfe einer Wasserwaage ausgerichtet. Zusätzlich werden die Positionen bei  $x_{\text{Anfang}}$ ,  $x_{\text{Ende}}$ ,  $s_{\text{Anfang}}$ ,  $s_{\text{Ende}}$ ,  $z_{\text{Anfang}}$  und  $z_{\text{Ende}}$  mit den Wagen angefahren. Dort werden jeweils die Abstände zu dem gerichteten MiniTec-Aufbau gemessen und so angepasst, dass die Schienen auf zum MiniTec parallelen Bahnen verlaufen. Mit dieser Methode kann die Position der HSS(1) mit einer Genauigkeit von  $\Delta x_1 = \Delta z_1 = \pm 1$  mm gegenüber dem MiniTec-Gerüst angegeben werden. Hinzu kommt die Ungenauigkeit  $\Delta x_2 = \Delta z_2 = \pm 1$  mm bei der Befestigung des Magneten(2). Der Positionierungsfehler des Magneten kann als Winkel  $\Delta\alpha^x \approx \frac{\Delta x_2}{l_2}$  und  $\Delta\alpha^z \approx \frac{\Delta z_2}{l_2}$  aufgefasst werden, wobei die Größe  $l_2$  für die Breite der Magnetbefestigung steht (siehe Tabelle 2.1).<sup>1</sup>

Damit ist der gesamte Fehler  $\Delta x_{ges}$  und  $\Delta z_{ges}$  durch

$$\Delta x_1 + s \tan\left(\frac{\Delta x_2}{l_2}\right) = \Delta x_{ges} \quad (2.1)$$

und

$$\Delta z_1 + s \tan\left(\frac{\Delta z_2}{l_2}\right) = \Delta z_{ges} \quad (2.2)$$

gegeben.  $l_2 = l_{\text{Magnetbef.}} = 250$  mm und  $s = 354$  mm führen zu einer Ungenauigkeit von  $\Delta x_{ges} = \Delta z_{ges} \pm 1$  mm. Bei der Transformation des Koordinatensystems des Messaufbaus in das des Magneten kommt zu diesem Fehler noch eine Ungenauigkeit der Hall-Sonden-Abmessungen und der dazugehörigen Schiene hinzu. Dieser liegt in der Größenordnung von  $\Delta x_{\text{trafo}} = \Delta z_{\text{trafo}} = \pm 0,7$  mm. Somit muss der Fehler zu  $\Delta x_{ges} = \Delta z_{ges} \approx \pm 2$  mm korrigiert werden.

Für den longitudinalen Fehler wurden verschiedene Aspekte berücksichtigt. Die Motoren wurden kalibriert, indem sie über eine bestimmte Strecke eine bestimmte Anzahl an Schritten durchgeführt haben. Aus dem Fehler für die zurückgelegte Strecke errechnet sich der Fehler  $\Delta s$ , der nur einem Tausendstel eines Millimeters entspricht, so dass er vernachlässigt werden kann. Auch die Möglichkeit des "Schlupfens" der Motoren wurde ausgeschlossen, indem eine bestimmte Position ausgesucht und wiederholt angefahren wurde, ohne dass eine Veränderung der Endposition gegenüber der Ausgangsposition gemessen werden konnte. Allerdings hat der Fehler in den transversalen Richtungen Auswirkungen auf den longitudinalen Fehler, so dass er aus diesen berechnet werden kann.

<sup>1</sup>Fehler werden in dieser Arbeit mit einem  $\Delta$  und Schrittbreiten mit  $\delta$  gekennzeichnet.

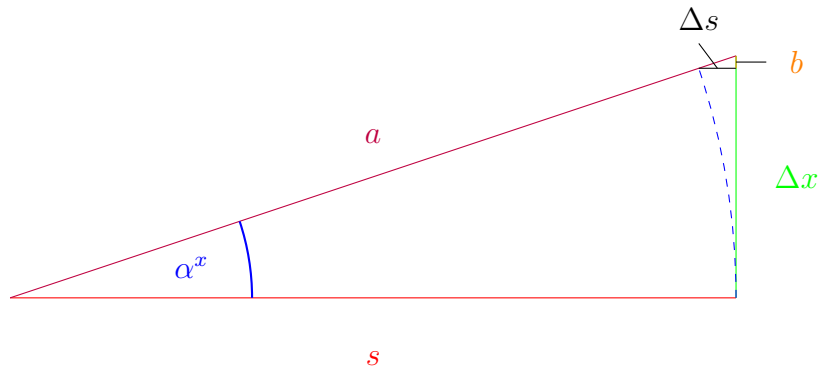


Abbildung 2.2.: Die Abbildung zeigt die Auswirkungen der vertikalen Fehler  $\Delta x$  und  $\Delta z$  am Beispiel von  $\Delta x$  auf die longitudinale Komponente  $s$

Nach Abbildung 2.2 gilt

$$(s)^2 + (\Delta x)^2 = a^2, \quad (2.3)$$

wobei  $s$  (Ankathete) der angefahrere Bereich in longitudinaler Richtung,  $\Delta x$  der Fehler der x-Position (Gegenkathete) und  $a$  die Hypotenuse des Dreiecks ist. Wenn man nun die Länge  $s$  auf die Hypotenuse projiziert, erhält man ein neues Dreieck, dessen Ankathete den Fehler  $\Delta s$  beschreibt. Es gilt

$$\Delta s = (a - s) \cos \alpha^x. \quad (2.4)$$

Setzt man  $a$  aus Gleichung 2.3 ein, erhält man

$$\Delta s = (\sqrt{s^2 + (\Delta x)^2} - s) \cos \alpha^x, \quad (2.5)$$

wobei  $\cos \alpha^x = \frac{s}{\sqrt{s^2 + (\Delta x)^2}}$  ist. Für  $\Delta x = \pm 2 \text{ mm}$  und  $s = 354 \text{ mm}$  ergibt sich für  $\Delta s = \pm 0,02 \text{ mm}$ . Der Fehler, der so entsteht, kann somit vernachlässigt werden, sodass die z-Komponente nicht mehr betrachtet werden muss. Somit ist  $\Delta s = \pm 0 \text{ mm}$ .

## 2.2.2. Stromquelle

Auch die Stromstärke ist mit einem systematischen Fehler behaftet. Um den Fehler herauszufinden, wurde der Verlauf der Stromstärke in Abhängigkeit von der eingestellten Spannung aufgenommen und an diesen eine Gerade der Form  $f(x) = mx + b$  angepasst (siehe Abbildung 2.3).

Die Fit-Parameter für den Graphen 2.3 lauten

$$m = 0,979 \frac{\text{A}}{\text{V}} \pm 0,001 \frac{\text{A}}{\text{V}} \quad (2.6)$$

und

$$b = -0,011 \text{ A} \pm 0,004 \text{ A}. \quad (2.7)$$

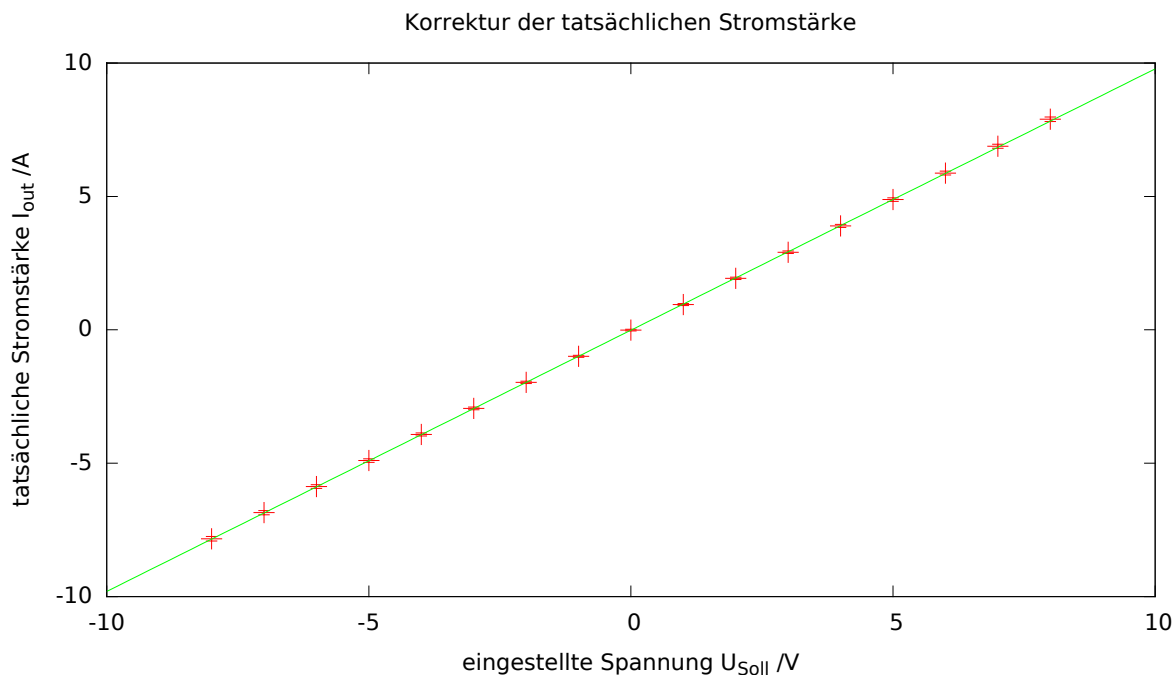


Abbildung 2.3.: Zusammenhang zwischen eingestelltem Sollwert in V und tatsächlicher Stromstärke.

Damit ist die Umrechnung der Spannung an der D/A-Karte zu der Stromstärke am Magneten gegeben durch:

$$I(U) = \left(0,979 \frac{\text{A}}{\text{V}} \pm 0,001 \frac{\text{A}}{\text{V}}\right) U - (0,011 \text{ A} \pm 0,004 \text{ A}) \quad (2.8)$$

mit einem Fehler von

$$\Delta I(U) = \sqrt{\left(\frac{dI(U)}{dm} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{dI(U)}{db} \Delta b\right)^2} \quad (2.9)$$

$$= \sqrt{\left(\left(\pm 0,0012 \frac{\text{A}}{\text{V}}\right) U\right)^2 + (0,0041 \text{ A})^2}. \quad (2.10)$$

### 2.2.3. Hall-Sonde

Eine weitere Fehlerquelle bildet die Hall-Sonde. Bei der Messung der magnetischen Flussdichte können verschiedene Faktoren das Signal der Sonde verfälschen. Der Hersteller beziffert den Fehler mit  $\pm 0,006\%$  des eingestellten Bereiches zuzüglich  $\pm 0,01\%$  des eigentlichen Messwertes [Gro, S.2-1]. Bei einem Meßbereich von 0,3 T ergibt dies eine grundsätzliche Ungenauigkeit von 0,018 mT. Hinzu kommt ein Fehler von  $\pm 0,01\%$  des Messwertes. Das bedeutet, dass bei Werten unter 1,8 mT die Ungenauigkeit, die aufgrund des eingestellten Bereiches zu Stande kommt, um einen Faktor 100 größer ist als der relative Fehler der Messwerte. Liegen die Werte im Bereich über 180 mT sind beide Fehlerabschätzungen

in der gleichen Größenordnung und addieren sich zu 0,036 mT. Trotz dieser Tatsache sind die Fehler bei einigen Hundert  $\mu\text{T}$  immer noch einen Faktor 10 kleiner als der gemessene Wert.

#### **2.2.4. Störfelder**

Der Messaufbau wurde in der Westhalle der ELSA-Anlage aufgebaut. Um elektromagnetische Einflüsse auf die Leiter während Strahlzeiten zu minimieren, wurde der Stromkreis zwischen dem Magneten und dem Netzteil mit Hilfe eines Kupfergeflechts isoliert. Allerdings lassen sich Fluktuationen in den Messwerten (z.B. durch das Erdmagnetfeld oder die benachbarten Geräte - wie das Synchrotron) der Hall-Sonde so nicht verhindern. Diese liegen allerdings im zweistelligen  $\mu\text{T}$ - Bereich und sind somit in den vom Hersteller angegebenen Fehlergrenzen, weshalb diese Effekte nicht weiter berücksichtigt werden und eine Untergrundmessung nicht nötig ist.



# 3. Durchführung

## 3.1. Vorüberlegung

Die Fehler begrenzen die maximale Auflösung des Messaufbaus hinsichtlich der Ortsauflösung so, dass es nicht sinnvoll ist eine Schrittbreite von unter 4 mm für  $\delta x$ ,  $\delta s$  und  $\delta z$  zu wählen. Die Hall-Sonde, die hier benutzt wird, besteht aus drei einzelnen Sonden ( $i = 1, 2, 3$ ), die, abhängig von ihrer Ausrichtung, jeweils einen Magnetfeldanteil messen ( $B_x$ ,  $B_s$  und  $B_z$ ) und die Komponenten der Flussdichte an ein dazugehöriges Teslameter senden. Sie sind wie in Abbildung 3.1 zu sehen in einem Abstand von 6 mm zu einander angeordnet, wobei die Sonde für die s-Komponente nochmals 2 mm von der Stirnfläche entfernt ist.

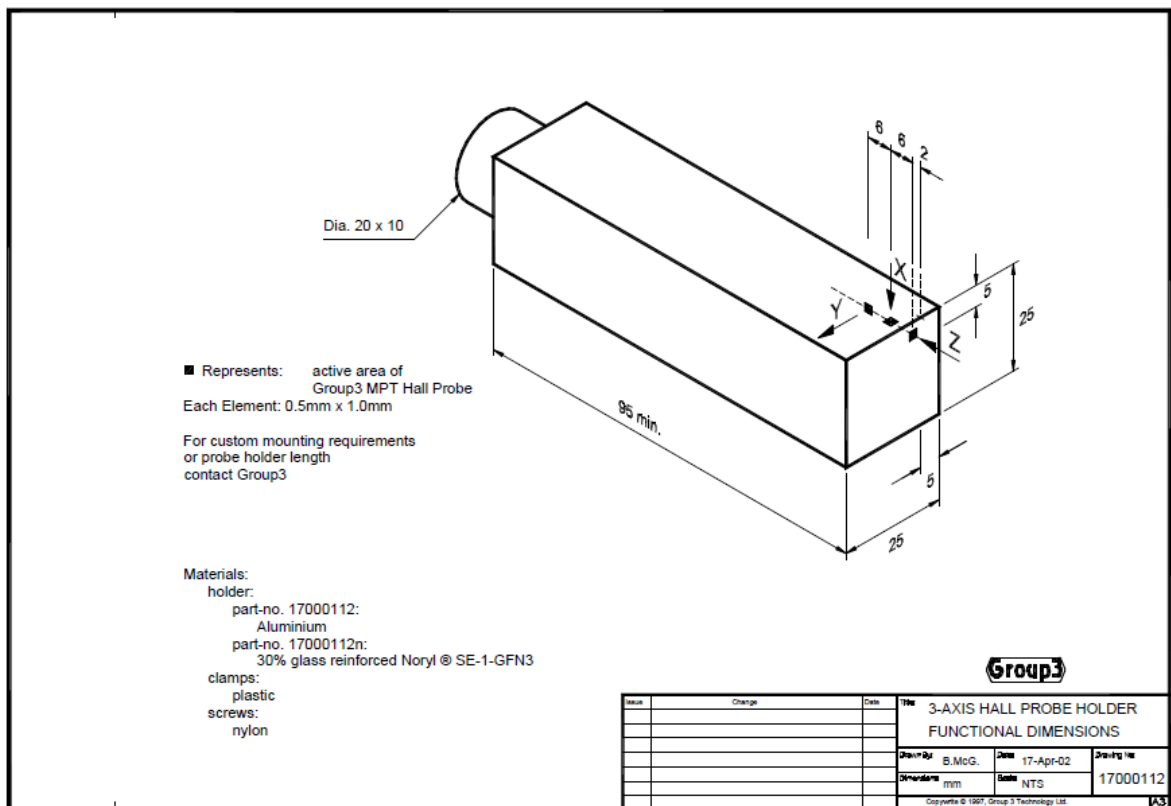


Abbildung 3.1.: Technische Zeichnung der verwendeten Hall-Sonden mit Halterung [Wes].  $B_x$  wird mit der x-Sonde,  $B_s$  mit der z-Sonde, und  $B_z$  mit der y-Sonde gemessen.

Um die Magnetfeldkomponenten eines Ortes zu erhalten, wird die Schrittbreite auf ein Vielfaches des Abstandes zwischen den einzelnen Sonden gesetzt. Eine Schrittbreite von 12 mm führt zu 7 Messungen entlang der x-Achse durch den Magneten. Da das Feld als stetig angenommen, aber eine Superposition aus zwei verschiedenen Feldern (dem Feld der Magnetspule und zwischen den Polschuhen) erwartet wird, liefert diese Konfiguration genug Stützstellen für eine geeignete Interpolation der Werte. Zudem verringert sich mit einer größeren Schrittbreite die benötigte Zeit für die einzelnen Messungen. Aus diesen Gründen wurde  $\delta x = \delta s = 12 \text{ mm}$  gewählt. Für die Vertikale Schrittbreite wurde ein Abstand von lediglich 5 mm gewählt, da durch die Abmessungen der vertikalen Befestigung nur 40 mm zur Verfügung stehen und die gleiche Stützstellenzahl wie in der x-Achse gewünscht ist. Die Konfiguration des Programms ist in Tabelle 3.1 zu sehen. Die Benutzeroberfläche befindet sich als Abbildung A.1 im Anhang.

Parameter	Wert
Schrittbreite $\delta x$	12 mm
Schrittbreite $\delta z$	5 mm
Schrittbreite $\delta s$	12 mm
Einschwingzeit $t$	4 s
Minimale Stromstärke $I_{min}$	-8 A
Maximale Stromstärke $I_{max}$	8 A
Schrittbreite Stromstärke $\delta I$	ca 0,5 A

Tabelle 3.1.: Übersicht der Konfiguration der LabView-Implementation für die Magnetfeldmessung.

### 3.1.1. Sättigung des Magneten

Um die Abhängigkeit des Magnetfeldes von der Stromstärke darzustellen, wurde die Hysteresekurve des Magneten aufgezeichnet. Dazu wird die Hall-Sonde mittig im Magneten positioniert. Nach der Entmagnetisierung des Magneten durch Anlegen einer Wechselspannung mit exponentiell abfallender Amplitude, wird die Neukurve aufgenommen. Daraufhin wird die Stromstärke von  $I_{min} = -8 \text{ A}$  bis  $I_{max} = 8 \text{ A}$  und von  $I_{max} = 8 \text{ A}$  bis  $I_{min} = -8 \text{ A}$  in einer Schrittbreite von  $\delta I = 0,5 \text{ A}$  erhöht bzw. gesenkt und die Daten gegen die magnetische Flussdichte aufgetragen.

Dabei kann man erkennen, dass die Hysterese des Magneten kaum erkennbare Ausmaße hat. Die Neukurve, die durch die gelbe Gerade dargestellt wird, verläuft innerhalb ihrer Fehlergrenzen durch den Ursprung. Dies ist ein Maß für die Genauigkeit der Messung. Außerdem liegen die Fehler für die magnetische Flussdichte und die Stromstärke in der gleichen Größenordnung wie mögliche Werte für die Remanenz und die Koerzitivstromstärke. Aus diesem Grund werden Hysterese-Effekte in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Allerdings kann eine Verschiebung des Nullpunktes über den Zeitraum der Messungen festgestellt werden. Wie im Anhang in Abbildung A.3 zu sehen, ist der

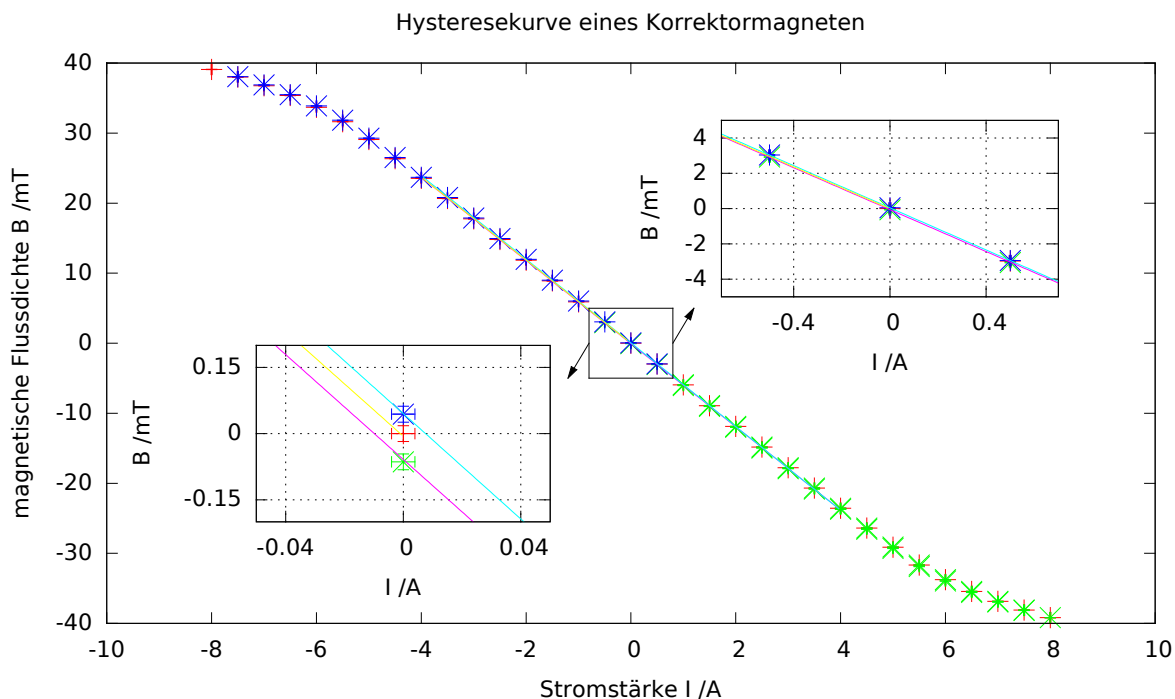


Abbildung 3.2.: Aufgenommene Hysterese eines Korrektormagneten mit Anpassung im linearen Bereich.

Nullpunkt im Vergleich zu Abbildung 3.2 verschoben. Aus diesem Graphen kann nur eine Größenordnung des Fehlers entnommen werden. Das führt dazu, dass auf jegliche aufgenommenen Messwerte ein zusätzlicher Fehler von  $\Delta B = \pm 0,1$  mT angenommen wird.

Die Messung besteht aus  $7 \times 30 \times 9 = 1890$  Punkten. Für jeden dieser Punkte wird die Stromstärke auf Werte zwischen  $I_{max} = 8$  A und  $I_{min} = -8$  A mit einer Schrittweite von  $\delta I = 0,5$  A gesetzt ( $\Rightarrow 33$  Schritte). Dabei wird, um den Magneten nicht unnötig lange auf maximale Belastung zu setzen, der Anfangspunkt auf  $I_{start} = 0,5$  A gelegt und die Stromstärke erst bis auf  $I_{max}$  erhöht, woraufhin die Stromstärke auf  $I_{min}$  gesetzt und der Strom wieder zurück auf 0 A inkrementiert wird. Dies ist aufgrund der kaum messbaren Hysterese des Magneten möglich und führt nicht zu einer Verfälschung der Werte (siehe Kap. 3.1.1). Da das Magnetfeld an jeder Position 4 s lang gemessen wird, beträgt die gesamte Messzeit  $1890 \times 33 \times 4$  s  $\approx 70$  h. Bei dieser langen Messzeit kann es möglicherweise vorkommen, dass die, in der Strahlzeit von ELSA liegenden, Messungen Fluktuationen aufweisen. Dadurch können die Messwerte verfälscht werden.

### 3.1.2. Filterkonstante der Hall-Sonde

Es besteht die Möglichkeit einen sogenannten Filterfaktor an den Teslametern einzustellen. Der Filter soll Fluktuationen vermindern, indem er die gemessenen Werte über einen vom Filterfaktor abhängigen Zeitraum gleitend mittelt. Der ausgegebene Messwert wird intern mit der Formel

$$F_{new} = F_{old} + \frac{F - F_{old}}{J}$$

berechnet. Dabei ist  $F$  der aktuell gemessene Wert,  $F_{old}$  der vorher berechnete Wert und  $J$  der Filterfaktor. Die Zeit, die die Sonde braucht, um bei einem gesetzten Filterfaktor den Wert  $F_{new}$  zu ermitteln wird mit

$$T = \frac{P}{\ln \frac{J}{J-1}}$$

berechnet [Gro].  $P$  ist hierbei eine Konstante und gibt die Zeit an, die eine einzige Messung benötigt. Es werden 10 Messungen pro Sekunde durchgeführt. Somit ist  $P = 0,1$ . Bei der standardmäßigen Einstellung von  $J = 41$ , ergibt sich für die Zeitkonstante ein Wert von  $T = 4,05$  s. Bei Werten, die in der Größenordnung von einigen mT liegen, ergibt sich die Abhängigkeit, die in der Abb.A.2 im Anhang zu sehen ist. Es ergibt sich eine Standardabweichung, die ungefähr um den Faktor 3 – 10 kleiner ist, als der für die Hall-Sonde angegebene Fehler (siehe Kap. 2.2.3). Somit ist die Einstellung eines Filterfaktors prinzipiell nicht notwendig. Wird aber die Zeit abgeschätzt, die die Hall-Sonde braucht, um einen Messwert zu ermitteln [Bal03, S.67], ist es durchaus sinnvoll, eine gewisse Zeit zu warten, bevor gemessen wird. Aus diesen Gründen wird für die Vermessung des Magneten ein Filterfaktor von  $J = 30$  mit einer Zeitkonstanten von  $T > 3$  s gewählt.

## 3.2. Messung

Bei den Messreihen werden die Magnetfeld-Komponenten  $B_x$ ,  $B_s$  und  $B_z$ , sowie die anliegende Stromstärke  $I$  an den Positionen  $x_{Sonde}^i$ ,  $z_{Sonde}^i$  und  $s_{Sonde}^i$  aufgezeichnet. Dabei sind die Werte für  $x$  und  $z$  für alle Sonden gleich, wie aus Abbildung 3.1 entnommen werden kann, allerdings  $s^i$  für jede Sonde unterschiedlich. Aus den aufgenommenen Werten werden mit Hilfe eines in C geschriebenen Programms alle gesuchten Parameter (die IFS, Fit-Parameter für Funktionen, die den Randfeldanteil darstellen, und die dazugehörigen Fehler) berechnet. Ausgehend von den Ergebnissen werden die Informationen graphisch im Beschleuniger-Koordinatensystem dargestellt. Der x- und z-Bereich entspricht der Breite  $b_{Magnet} = 122$  mm bzw. der Höhe  $h_{Magnet} = 60$  mm des Magneten. In s-Richtung wird keine Definition des Ursprungs vorgenommen, da ein solcher für die Auswertung unerheblich ist. Der Mittelpunkt des Magneten befindet sich bei  $s \approx 178$  mm.

# 4. Auswertung

## 4.1. Verlauf der Magnetfeld-Komponenten

Aus den Messungen werden zunächst die Verläufe der magnetischen Flussdichte  $B_x$  in Abhängigkeit der Position entnommen. Um eine gute Vergleichsmöglichkeit zu bieten, werden ab diesem Zeitpunkt nur exemplarisch jeweils Graphen für  $I_1 = -2,0\text{ A}$  und  $I_2 = -3,9\text{ A}$  gezeigt. In x-Richtung bei  $z \approx 0\text{ mm}$  verläuft das Feld wie in Abbildung 4.1 zu sehen. Dabei kann eine Symmetrie um den Ursprungspunkt festgestellt werden. Die  $B_x$ -Komponente des Feldes ist, wie erwartet, mittig im Magneten am geringsten und wird in Richtung der beiden Polschuhe größer. Dies kann durch eine Funktion der Form

$$B_x(x) = \frac{a_1}{(x-b)^2} + \frac{a_2}{(x+b)^2} + c \quad (4.1)$$

beschrieben werden. Der erste bzw. zweite Term ist dabei das mit  $\frac{1}{r^2}$  abfallende Magnetfeld des ersten bzw. zweiten Polschuhs. Mit dem Parameter  $c$  kann dieser Funktion ein zusätzlicher Offset gegeben werden, der proportional zur anliegenden Stromstärke ist. Wie im Graphen 4.1 zu sehen, erfüllen die Felder tatsächlich diese Bedingung.

Außerdem fällt auf, dass bei einer etwa doppelt so großen Stromstärke auch das Feld doppelt so groß ist. Für  $I_2 = -3,9\text{ A}$  ist die magnetische Flussdichte  $B$  noch linear von  $I$  abhängig (siehe Abbildung 3.2), so dass beim Vergleich der beiden Kurven genau dieser Faktor erwartet wird.

Der Feldverlauf in z-Richtung bei  $x \approx 1\text{ mm}$  ist in Abbildung 4.2 zu sehen.

Hier fällt auf, dass die Symmetrie um den Ursprung gestört ist. In der Nähe der Spule (oben,  $z > 0$ ) ist das Feld größer als im unteren Bereich des Magneten. Dazwischen befindet sich das Maximum des Feldes. Allerdings ist dieses nicht im Ursprung bei  $z \approx 0\text{ mm}$ , sondern etwas verschoben bei  $z \approx 15\text{ mm}$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Felder der Polschuhe und der Magnetspule überlagern. Die Spule ist so am Magneten angebracht, dass die parallel zur Spule verlaufende Komponente des Feldes als Teil des  $B_x$ -Feldes zwischen den Polschuhen gemessen wird. Dieses Feld nimmt mit dem Abstand zur Spule ab. Gleichzeitig ist das Feld der Polschuhe in der Mitte des Magneten am größten. Der Einfluss des Spulen-Feldes ist nicht vernachlässigbar, so dass bei der IFS der  $B_x$ -Komponente ein ähnlicher Verlauf in z-Richtung erwartet wird.

Entlang der s-Achse verläuft das Feld in der Mitte des Magneten ( $x \approx z \approx 0\text{ mm}$ ) wie in Abbildung 4.3 dargestellt.

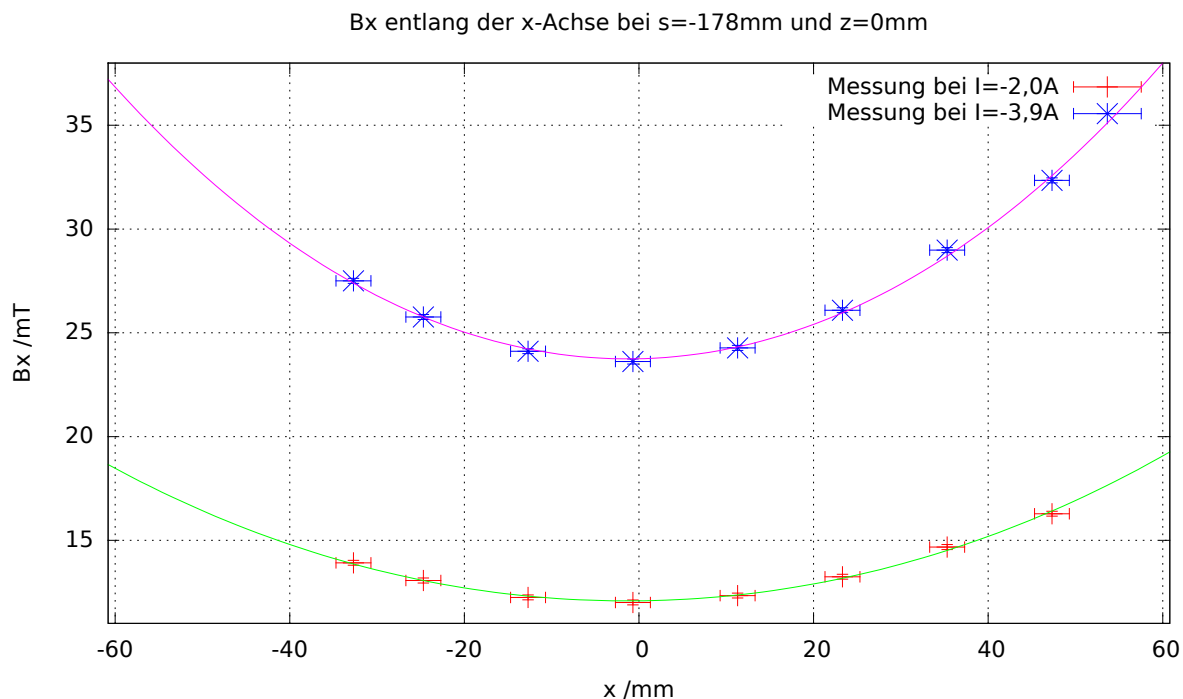


Abbildung 4.1.: Verlauf der x-Komponente der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit der Position auf der x-Achse bei  $I_1 = -2,0$  A und  $I_2 = -3,9$  A.

Hier erkennt man wieder die lineare Abhängigkeit des Feldes von der Stromstärke. Um den Mittelpunkt des Magneten (bei  $s \approx -175$  mm) bildet sich wie erwartet ein symmetrischer Verlauf aus. Bei Polschuh-nahen Messungen sieht man, dass das Feld innerhalb des Magneten homogen verläuft (siehe Abbildung 4.4). Die beiden Erhöhungen an den Enden des Magneten kommen dabei durch die Geometrie der Polschuhe zu Stande. An diesen Stellen sind die Polschuhe nicht mehr plan, sondern haben eine Schräge, die jeweils nach außen zeigt (siehe Abbildung 1.4).

Der Verlauf von  $B_z$  wird zusätzlich betrachtet, um eine Ablenkung in horizontaler Ebene ausschließen zu können. Ein nicht verschwindender Anteil der integrierten Feldstärke von  $B_z$  führt zu einer horizontalen Ablenkung der Teilchen.

Im Anhang A.4 und A.5 sind die Verläufe von  $B_z$  gegen die Achsen  $x$  und  $z$  für die Ströme  $I_1$  und  $I_2$  aufgetragen. Dort ist die Größenordnung des Feldes erkennbar. Die Werte sind da annähernd konstant über die betrachtete Distanz. Durch den verschobenen Nullpunkt, wie er in Abbildung A.3 zu sehen ist, entsteht ein Offset, der zu diesem Verlauf führt. Um eine Aussage über den Einfluss der  $B_z$ -Komponente auf die Korrektur treffen zu können, muss diese in Abhängigkeit der Position auf der Strahl-Achse betrachtet werden. Entlang dieser erkennt man in Abbildung 4.5, dass sich das Feld etwa nach der halben Strecke umpolt. Allerdings verläuft das Feld nicht symmetrisch um den Mittelpunkt des Magneten. Dieser Effekt könnte, wie bei der  $B_x$ -Komponente, damit zusammen hängen, dass das Spulen-Feld einen Einfluss auf die Messungen hat.

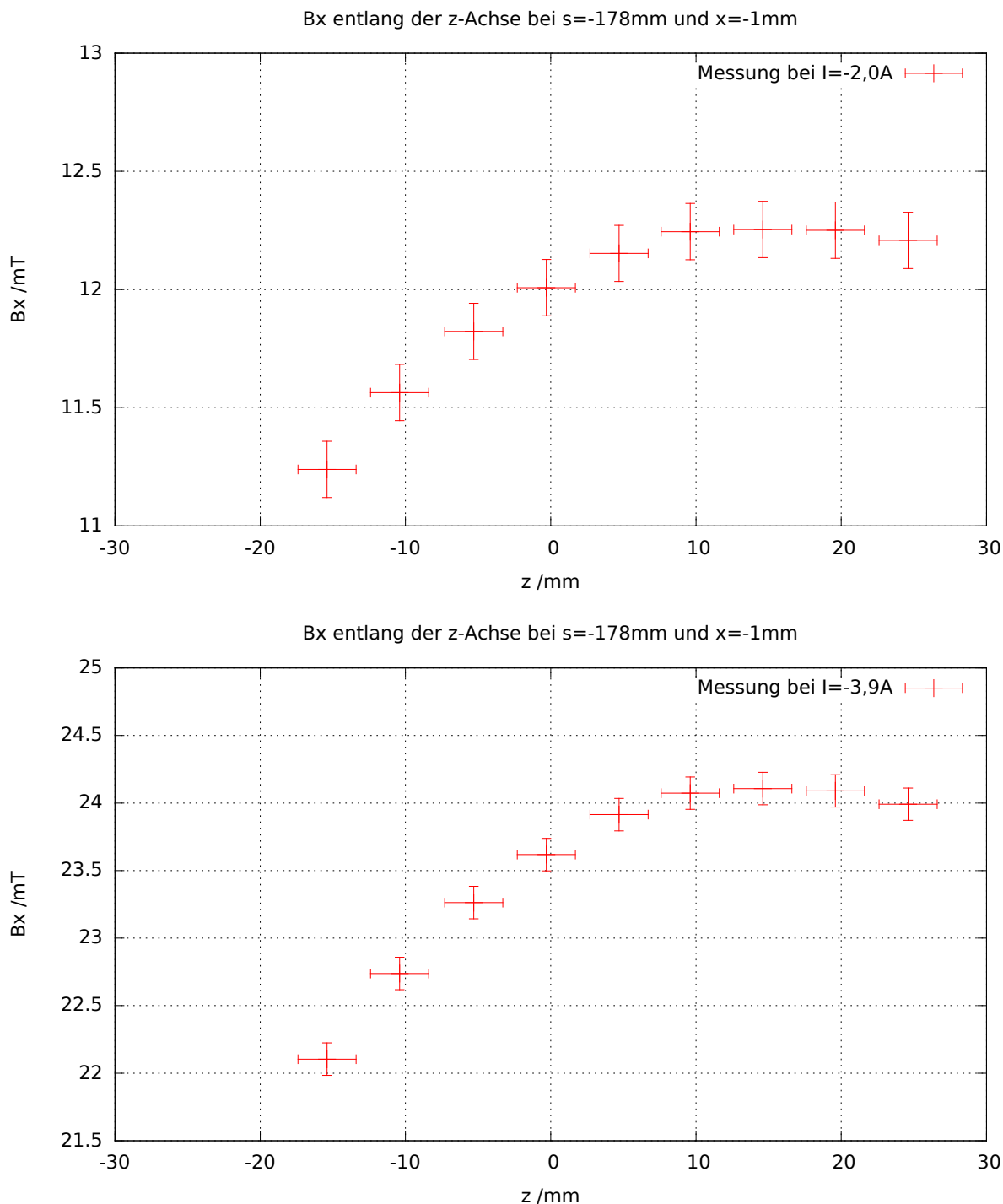


Abbildung 4.2.: Verlauf der x-Komponente der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit der Position auf der z-Achse bei  $I_1 = -2,0$  A und  $I_2 = -3,9$  A.

## 4.2. Integrierte Feldstärke $IFS_{B_{\perp}}$

Wie im Abschnitt 1.2.3 erläutert, ist die IFS entscheidend für die Korrektur. Sie wird aus den Messdaten ermittelt. Dazu wird ein Programm in C implementiert, welches das Produkt  $B_{\perp}l$  aus Gleichung 1.3 berechnet. Die magnetische Flussdichte  $B_{\perp}$  entlang  $s$  durch den Magneten ( $x = z = \text{const.}$ ) wird an jeder Position mit der Schrittbreite  $\delta s$

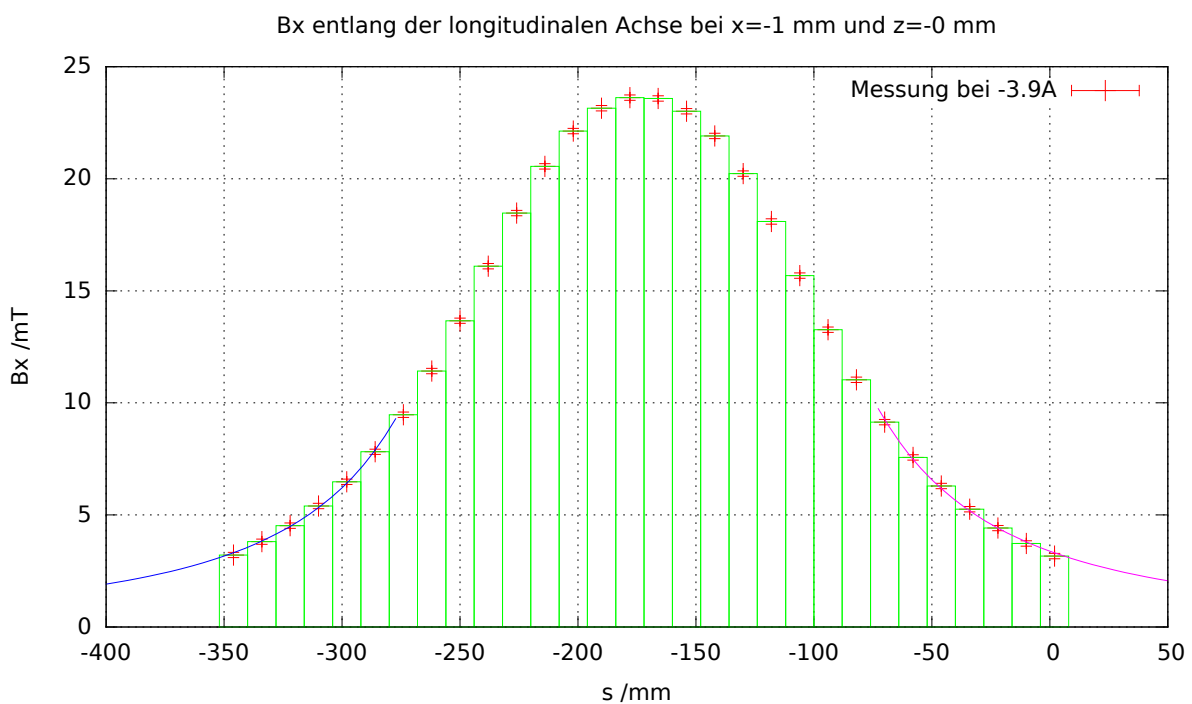
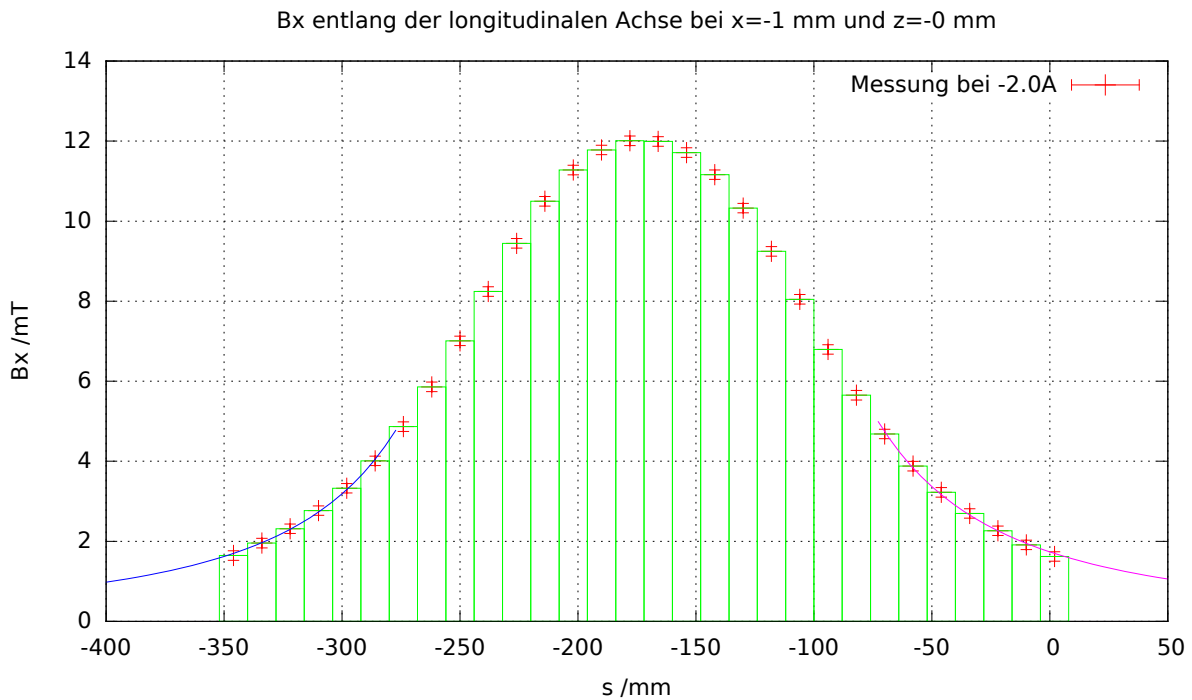


Abbildung 4.3.: Verlauf der x-Komponente der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit der Position auf der s-Achse bei  $I_1 = -2 \text{ A}$  und  $I_2 = -3,9 \text{ A}$ .

multipliziert und die Summe dieser Ergebnisse berechnet. Es wird angenommen, dass sich das Magnetfeld zwischen den Schritten annähernd linear verhält, so dass die Näherung durch die Summe für das Integral gültig ist. Zur Veranschaulichung werden in Abbildung 4.3 bis 4.5 die Flächen der Breite  $\delta s$  um jeden Datenpunkt eingezeichnet. Dies ergibt mit dem linearen Verlauf des Feldes in diesem Bereich eine Näherung für die tatsächliche Fläche unter dem Bereich, der beobachtet wird.



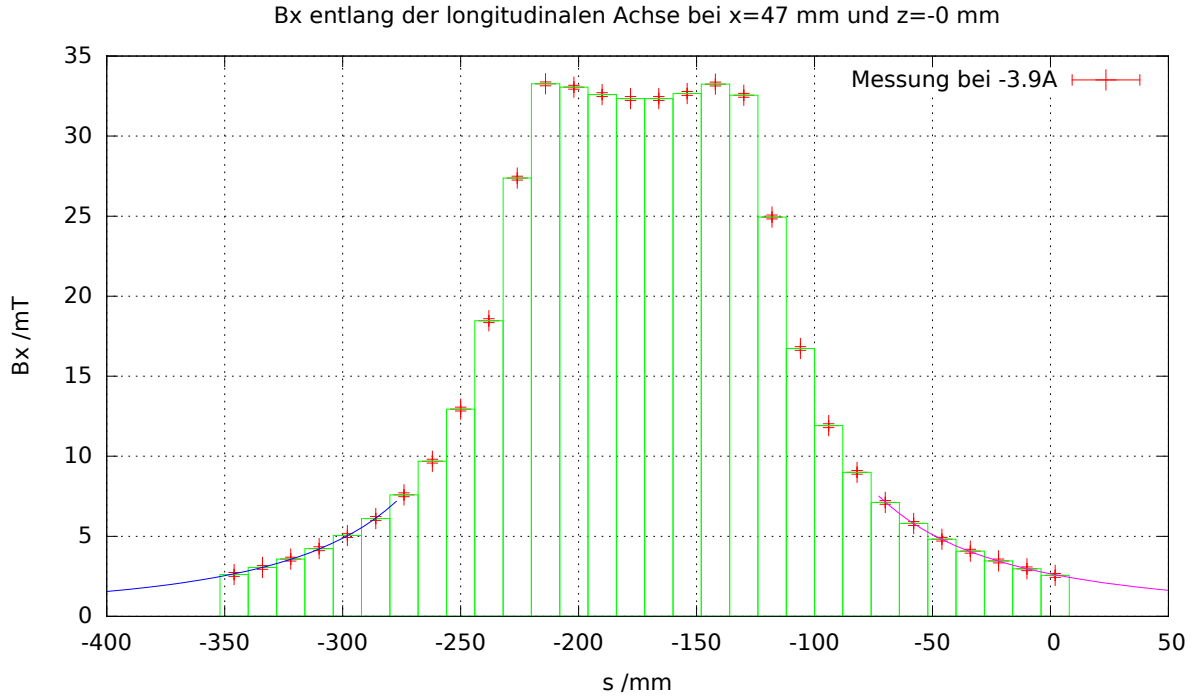


Abbildung 4.4.: Verlauf der x-Komponente der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit der Position auf der s-Achse bei  $I_2 = -3,9$  A und in Polschuh-Nähe.

Dies geschieht für die verschiedenen Stromstärken separat für die Koordinaten x und z. Aufgrund der Limitierung des Messbereichs (siehe Abbildung 2.1) fehlen jedoch die weiter entfernten Randfelder, so dass an diese jeweils eine  $\frac{1}{r^2}$ -abhängige Funktion der Form  $f(s) = \frac{a}{(s-b)^2}$  angepasst werden muss. Der fehlende Teil des Feldes wird nach der Integration dieser Funktion und dem Einsetzen geeigneter Grenzen zur IFS hinzu addiert.

$$\int_{s_{B_{\perp}}^{\text{Anfang}} + \frac{\delta s}{2}}^{\infty} f_{\text{rechts}}(s) ds = \left[ \frac{-a_1}{(s-b_1)^2} \right]_{s_{B_{\perp}}^{\text{Anfang}} + 6 \text{ mm}}^{\infty} = \frac{a_1}{((s_{B_{\perp}}^{\text{Anfang}} + 6 \text{ mm}) - b_1)^2} \quad (4.2)$$

und

$$\int_{-\infty}^{s_{B_{\perp}}^{\text{Ende}} - \frac{\delta s}{2}} f_{\text{links}}(s) ds = \left[ \frac{-a_2}{(s-b_2)^2} \right]_{-\infty}^{s_{B_{\perp}}^{\text{Ende}} - 6 \text{ mm}} = \frac{-a_2}{((s_{B_{\perp}}^{\text{Ende}} - 6 \text{ mm}) - b_2)^2} \quad (4.3)$$

ergeben mit der Summe über alle gemessenen  $B_{\perp}$ -Werte multipliziert mit der Schrittweite  $\delta s$  somit die integrierte Feldstärke

$$\text{IFS} = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) ds \approx \int_{-\infty}^{s_{B_{\perp}}^{\text{Ende}} - 6 \text{ mm}} f_{\text{links}}(s) ds + \sum_{i=1}^{30} B_{\perp}^i \delta s + \int_{s_{B_{\perp}}^{\text{Anfang}} + 6 \text{ mm}}^{\infty} f_{\text{rechts}}(s) ds. \quad (4.4)$$

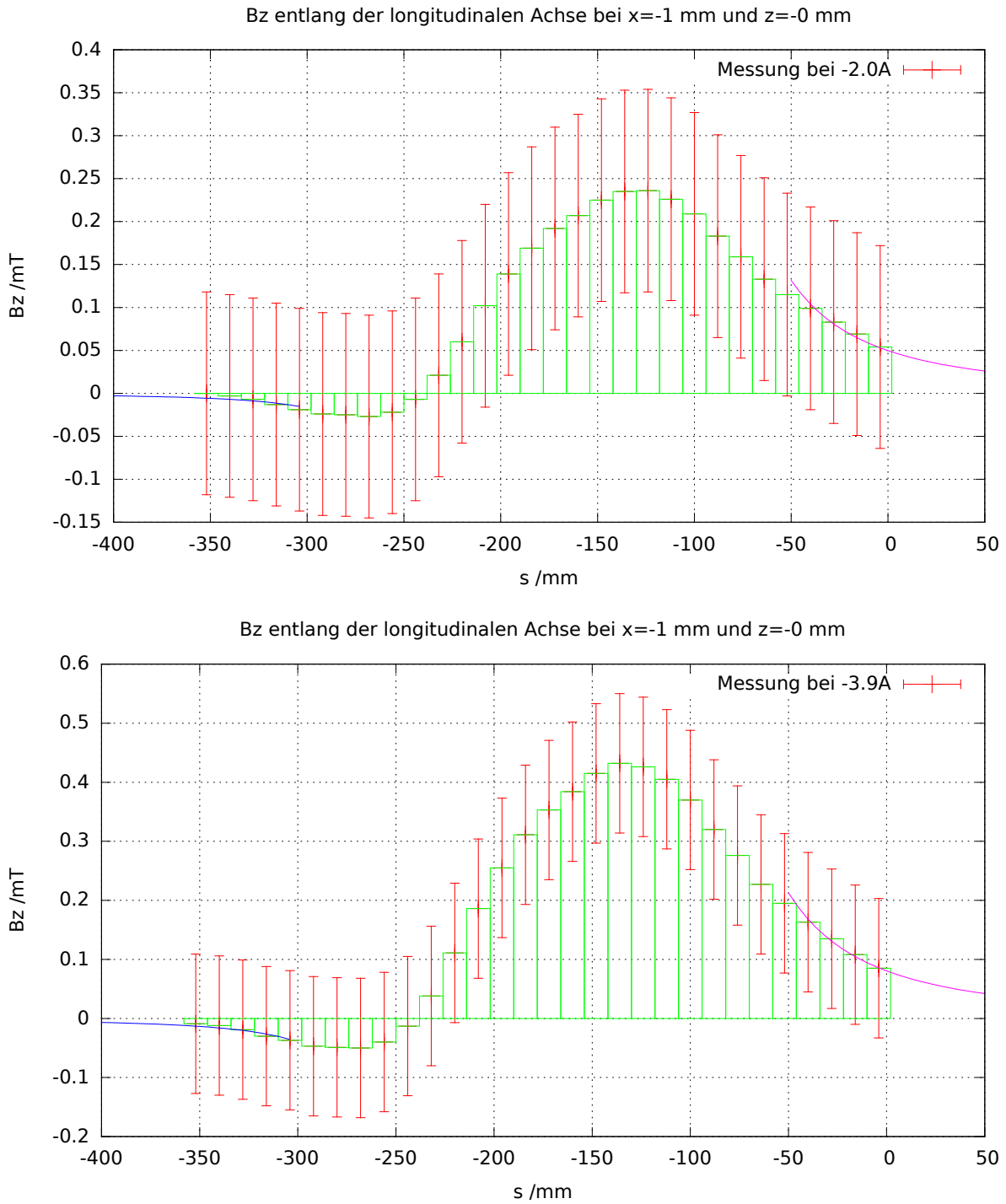


Abbildung 4.5.: Verlauf der z-Komponente der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit der Position auf der s-Achse bei  $I_1 = -2,0 \text{ A}$  und  $I_2 = -3,9 \text{ A}$ .

Hierbei ist  $s_{B_{\perp}}^{\text{Anfang}}$  die erste Position an der  $B_{\perp}$  gemessen wurde und  $s_{B_{\perp}}^{\text{Ende}}$  die Letzte. Da die Sonden einen Abstand von 6 mm zu einander aufweisen, ist  $s_{B_x}^{\text{Anfang/Ende}} = s_{B_z}^{\text{Anfang/Ende}} + 6 \text{ mm}$ .

Der Fehler, den dieser Fit zusätzlich generiert, kann mit den Formeln

$$\Delta f_{\text{rechts}}(s) = \sqrt{\left(\frac{d\left(\frac{a_1}{((s_{B_z}^{\text{Anfang}}+6)-b_1)^2}\right)}{da_1}\Delta a_1\right)^2 + \left(\frac{d\left(\frac{a_1}{((s_{B_z}^{\text{Anfang}}+6)-b_1)^2}\right)}{db_1}\Delta b_1\right)^2} \quad (4.5)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{((s_{B_z}^{\text{Anfang}}+6)-b_1)^2}\right)^2 + \left(\frac{2a_1\Delta b_1}{((s_{B_z}^{\text{Anfang}}+6)-b_1)^3}\right)^2} \quad (4.6)$$

und

$$\Delta f_{\text{links}}(s) = \sqrt{\left(\frac{d\left(\frac{-a_2}{((s_{B_z}^{\text{Ende}}-6)-b_2)^2}\right)}{da_2}\Delta a_2\right)^2 + \left(\frac{d\left(\frac{-a_2}{((s_{B_z}^{\text{Ende}}-6)-b_2)^2}\right)}{db_2}\Delta b_2\right)^2} \quad (4.7)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{-\Delta a_2}{((s_{B_z}^{\text{Ende}}-6)-b_2)^2}\right)^2 + \left(\frac{-2a_2\Delta b_2}{((s_{B_z}^{\text{Ende}}-6)-b_2)^3}\right)^2} \quad (4.8)$$

errechnet werden. Für  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $\Delta a_i$ ,  $\Delta b_i$  werden die Werte eingesetzt, die von Gnuplot, einem Plot-Programm mit integrierter Fit-Funktion, für jede Position und Stromstärke berechnet wurden. Der Fehler für das Produkt  $B_{\perp}\delta s$  berechnet sich aus:

$$\Delta(B_{\perp}\delta s) = \sqrt{\left(\frac{d(B_{\perp}\delta s)}{dB_{\perp}}\Delta B_{\perp}\right)^2 + \left(\frac{d(B_{\perp}\delta s)}{d\delta s}\Delta\delta s\right)^2} \stackrel{\Delta s=0\text{mm}}{=} \Delta B_{\perp}\delta s. \quad (4.9)$$

Um den gesamten Fehler  $\Delta\text{IFS}$  zu erhalten, müssen die Fehler  $\Delta f_{\text{rechts}}(s)$ ,  $\Delta f_{\text{links}}(s)$  und  $\Delta(B_{\perp}\delta s)$  addiert werden.

In der Abbildung 4.6 ist die integrierte Feldstärke der  $B_x$ -Komponente zu sehen. Analog zum Verlauf von  $B_x$  entlang der x-Achse (siehe Abbildung 4.1), ist der Verlauf der IFS Achsen-symmetrisch um  $x \approx 1$  mm. Auch der Verlauf von  $B_x$  entlang der z-Achse (siehe Abbildung 4.2 und 4.7) spiegelt sich im Verlauf der  $IFS_{B_x}$  wider. Zusätzlich ist im Anhang A.6 und A.7 der Verlauf der  $IFS_{B_z}$  für  $I_1$  und  $I_2$  zu finden.

Für jeden der 70 Punkte, die in der x-z-Ebene vermessen werden, ergeben die Rechnungen dann abhängig von der Position, an der die Teilchen durch den Magneten fliegen, einen Verlauf der integrierten Feldstärke wie er in Abbildung 4.8 für die  $B_x$ - und in Anhang A.8 für die  $B_z$ -Komponente zu sehen ist.

Zusätzlich wird der besonders interessante Bereich, in dem sich der Strahl bewegt ( $h_{\text{Strahl}} = 10$  mm,  $b_{\text{Strahl}} = 40$  mm), und die Maße der Vakuumkammer ( $h_{\text{Kammer}} = 42$  mm,  $b_{\text{Kammer}} = 100$  mm) eingezeichnet, um zu zeigen, dass sich die Integrierte Feldstärke in diesem Bereich nicht stark ändert. Die Werte werden interpoliert, damit der Verlauf der IFS und deren Symmetrien erkennbar werden. Die Symmetrien entsprechen denen in den Graphen 4.1 und 4.2.

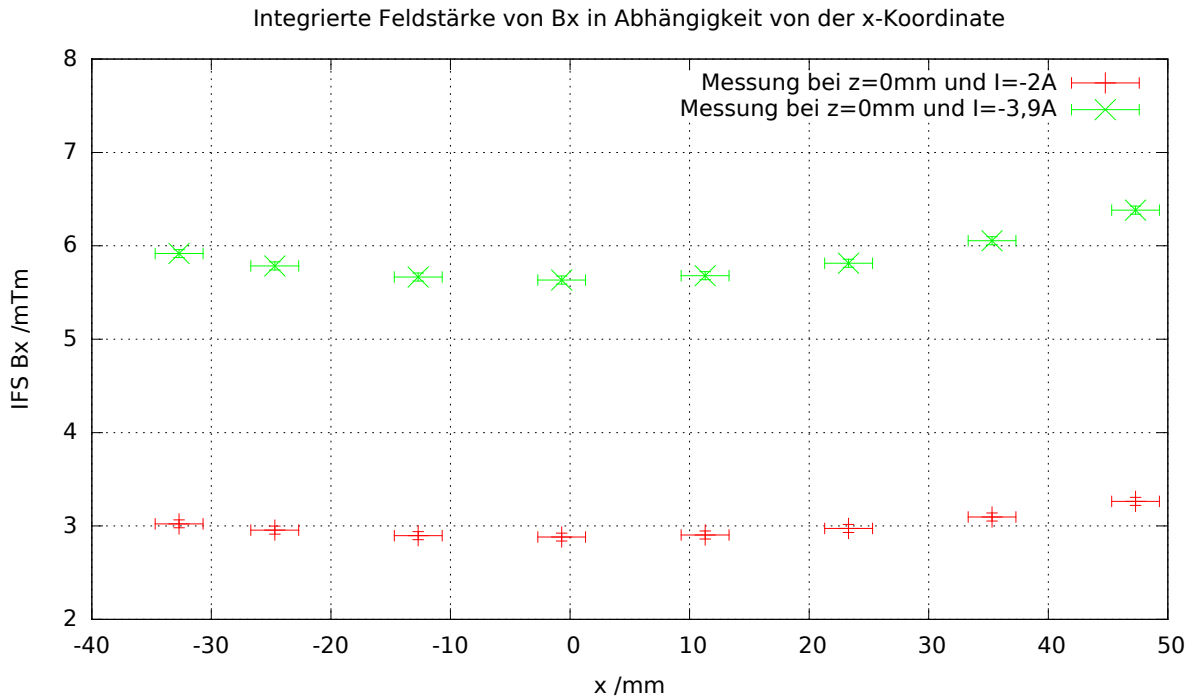


Abbildung 4.6.: Der Graph zeigt die integrierte Feldstärke von  $B_x$  in Abhängigkeit der x-Position bei  $I_1 = -2,0\text{ A}$  und  $I_2 = -3,9\text{ A}$ .

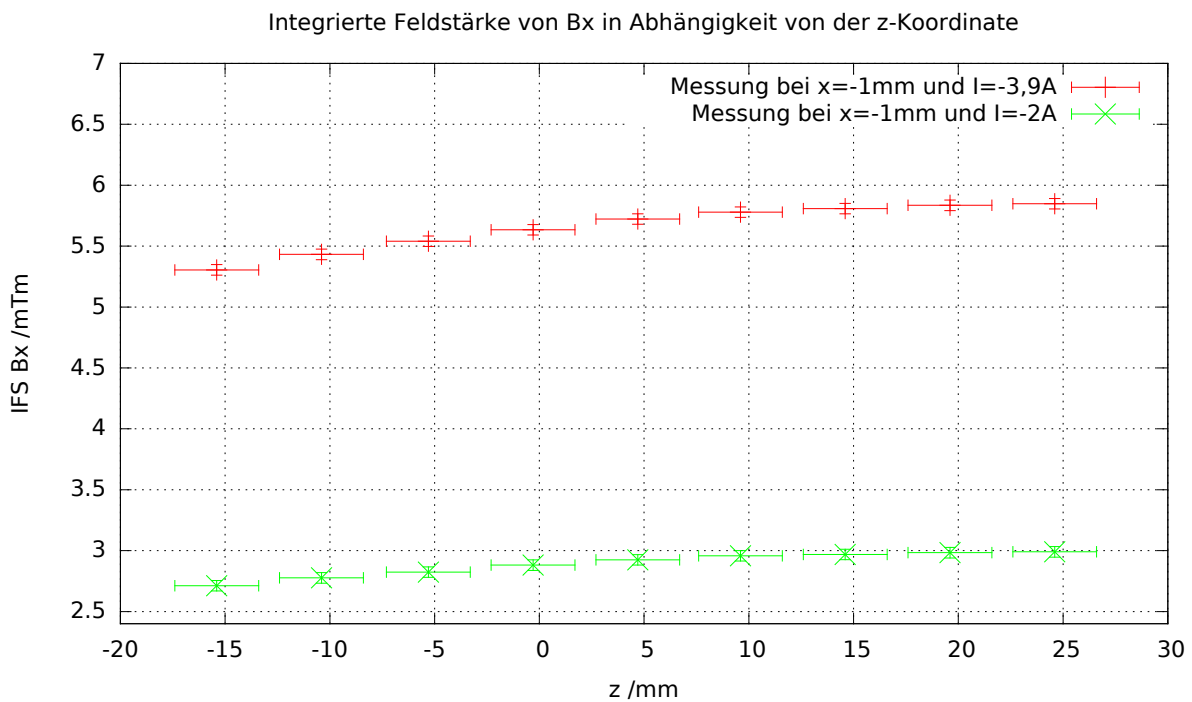


Abbildung 4.7.: Der Graph zeigt die integrierte Feldstärke von  $B_x$  in Abhängigkeit der z-Position bei  $I_1 = -2,0\text{ A}$  und  $I_2 = -3,9\text{ A}$ .

Die IFS im eingezeichneten Bereich, in dem sich der Strahl bewegt, kann als annähernd konstant angesehen werden, so dass es möglich ist, die Werte dort fehlergewichtet zu mit-

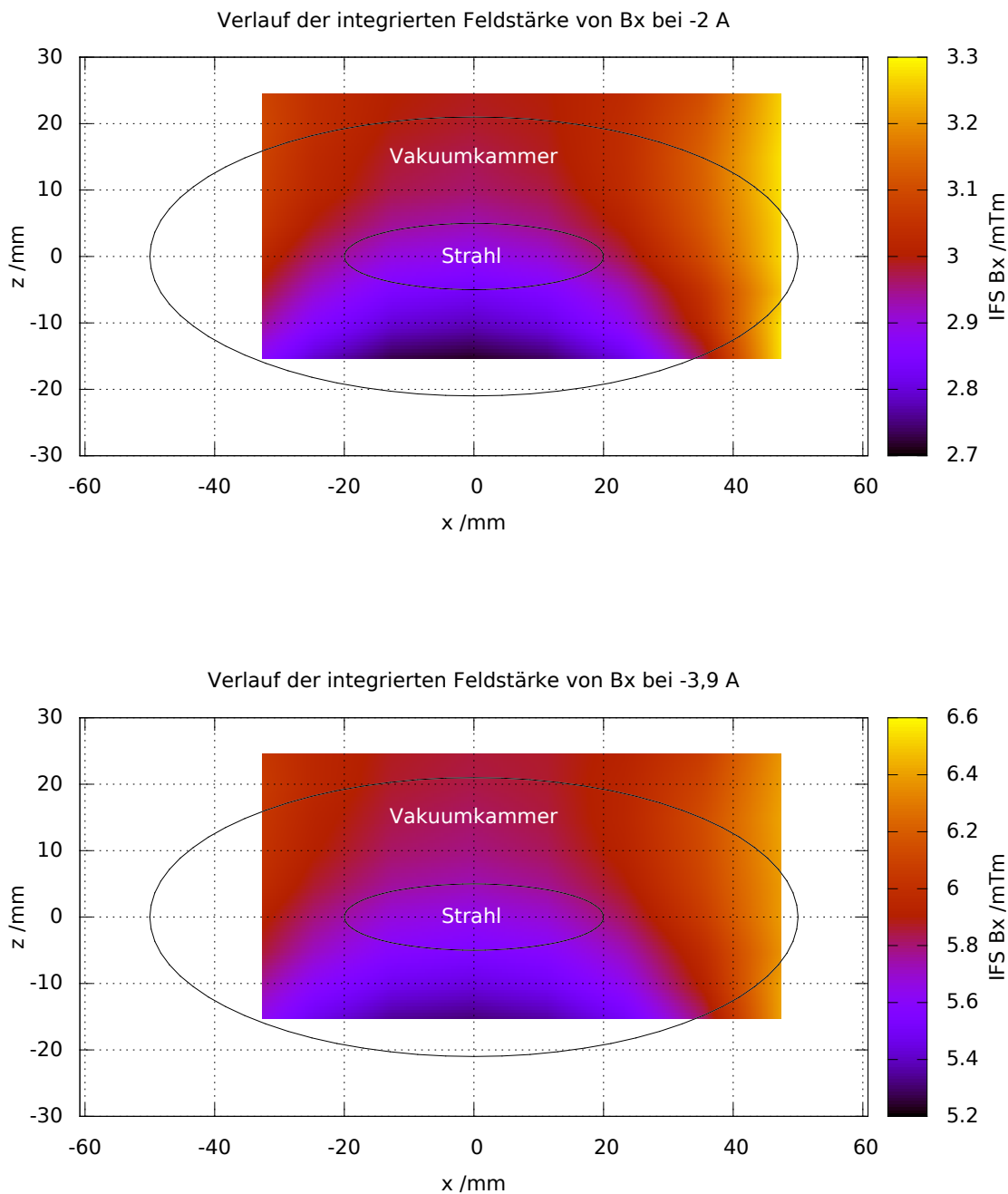


Abbildung 4.8.: Der Graph zeigt die integrierte Feldstärke von  $B_x$  in Abhängigkeit der x- und z-Position bei  $I_1 = -2,0$  A und  $I_2 = -3,9$  A.

tehn. Danach kann die Abhängigkeit der IFS von der am Magneten anliegenden Stromstärke dargestellt werden. Das fehlergewichtete Mittel wird mit der Formel

$$\overline{\text{IFS}} = \frac{\sum \omega_i \text{IFS}_i}{\sum \omega_i} \tag{4.10}$$

mit

$$\omega_i = \frac{1}{(\Delta \text{IFS}_i)^2} \quad (4.11)$$

ermittelt. Der Fehler dazu wird mit

$$\Delta \overline{\text{IFS}} = \frac{1}{\sqrt{\sum \omega_i}} \quad (4.12)$$

errechnet. Man kann den Verlauf der IFS von  $B_x$  gegen die Stromstärke darstellen (siehe Abbildung 4.9).

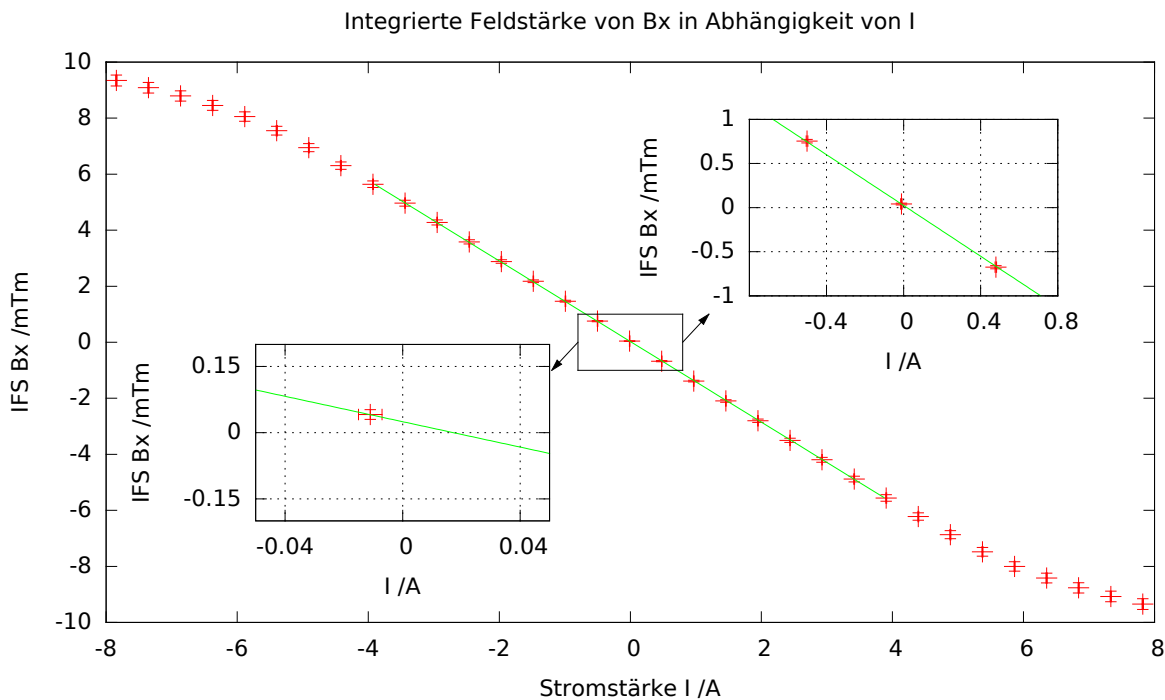


Abbildung 4.9.: Der Graph zeigt die integrierte Feldstärke von  $B_x$  in Abhängigkeit von der Stromstärke.

Im Vergleich dazu ist die Größenordnung, in der die IFS der  $B_z$ -Komponente liegt, um einen Faktor 100 kleiner (siehe Abbildung 4.10). Sie hat einen ähnlichen Verlauf wie die  $\text{IFS}_{B_x}$ .

An den Verlauf wurde jeweils eine Gerade der Form  $f(x) = mx + b$  angepasst. Dabei wurde nur der Bereich von  $I_{\min} = -4 \text{ A}$  bis  $I_{\max} = 4 \text{ A}$  beachtet, da in diesem auch die Hysterese linear verläuft. Aus den Fit-Parametern können die Gleichungen

$$\text{IFS}_{B_x}(I) = \left( -1,439 \frac{\text{mTm}}{\text{A}} \pm 0,002 \frac{\text{mTm}}{\text{A}} \right) I + (0,025 \text{ mTm} \pm 0,005 \text{ mTm}) \quad (4.13)$$

und

$$\text{IFS}_{B_z}(I) = \left( -0,0135 \frac{\text{mTm}}{\text{A}} \pm 0,0001 \frac{\text{mTm}}{\text{A}} \right) I + (0,0119 \text{ mTm} \pm 0,0003 \text{ mTm}) \quad (4.14)$$

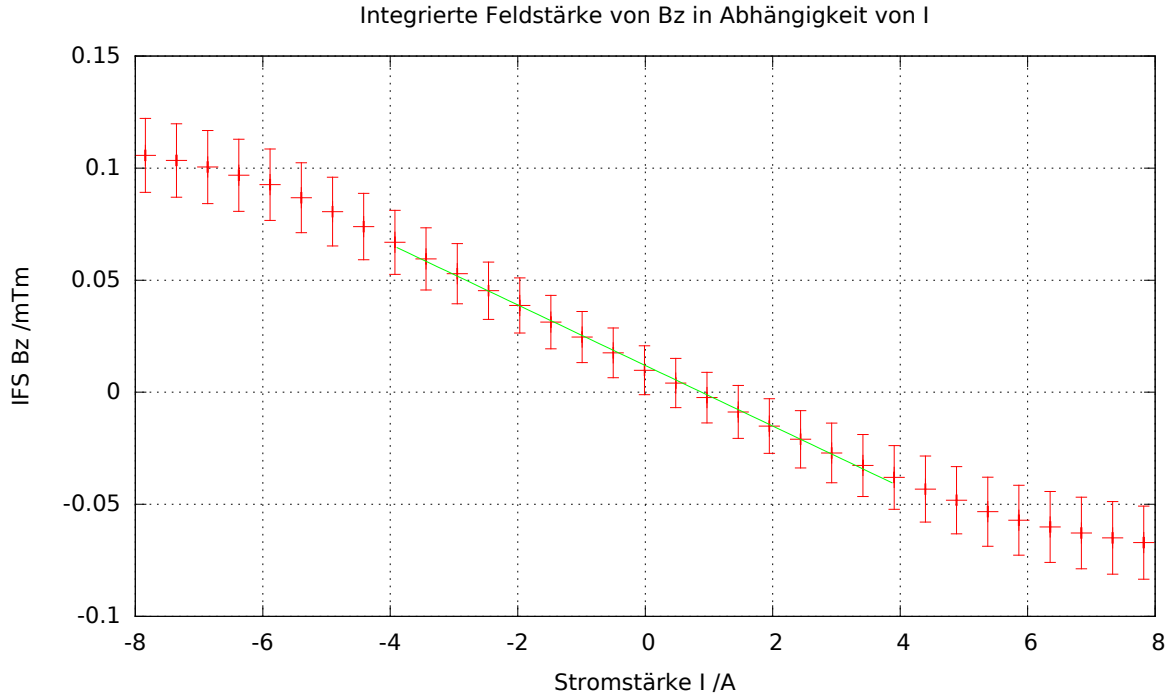


Abbildung 4.10.: Der Graph zeigt die integrierte Feldstärke von  $B_z$  in Abhängigkeit von der Stromstärke.

aufgestellt werden. Der bei  $I = 8,09$  A von A.Balling gemessene Wert von  $\text{IFS}_{B_x} = 9,35$  mT m liegt wie in Abbildung 4.9 zu sehen nicht mehr im linearen Bereich [Bal03]. Aus den Daten für diesen Graphen kann man aber für  $I = 7,82$  A  $\pm 0,01$  A einen Wert von  $\text{IFS}_{B_x} = 9,5$  mT m  $\pm 0,2$  mT m entnehmen.

### 4.3. Ablenkwinkel $\alpha$

Mit der Gleichung 1.9 für den Ablenkwinkel sowie den Gleichungen 4.13 und 4.14 kann dieser Winkel als Funktion der Stromstärke dargestellt werden. Dies ergibt:

$$\alpha(I, E)_{\text{vertikal}} = \frac{ec \text{IFS}_{B_x}(I)}{E} \quad (4.15)$$

$$= \frac{ec}{E} \left( \left( -1,439 \frac{\text{mTm}}{\text{A}} \pm 0,002 \frac{\text{mTm}}{\text{A}} \right) I + (0,025 \text{ mT m} \pm 0,005 \text{ mT m}) \right) \quad (4.16)$$

$$= \frac{1}{E} \left( (-431,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-6} \frac{\text{GeV}}{\text{A}} \cdot I + (7,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6} \text{ GeV} \right), \quad (4.17)$$

$$\alpha(I, E)_{\text{horizontal}} = \frac{ec \text{IFS}_{B_z}(I)}{E} \quad (4.18)$$

$$= \frac{ec}{E} \left( \left( -0,0135 \frac{\text{mTm}}{\text{A}} \pm 0,0001 \frac{\text{mTm}}{\text{A}} \right) I + (0,0119 \text{ mT m} \pm 0,0003 \text{ mT m}) \right) \quad (4.19)$$

$$= \frac{1}{E} \left( (-4,05 \pm 0,03) \cdot 10^{-6} \frac{\text{GeV}}{\text{A}} \cdot I + (3,57 \pm 0,09) \cdot 10^{-6} \text{ GeV} \right). \quad (4.20)$$

Abschließend wird der Verlauf des Ablenkwinkels exemplarisch für die beiden Energien  $E_1 = 2,3 \text{ GeV}$  und  $E_2 = 3,2 \text{ GeV}$  aufgezeichnet. Dies ergibt die Graphen 4.11 und 4.12.

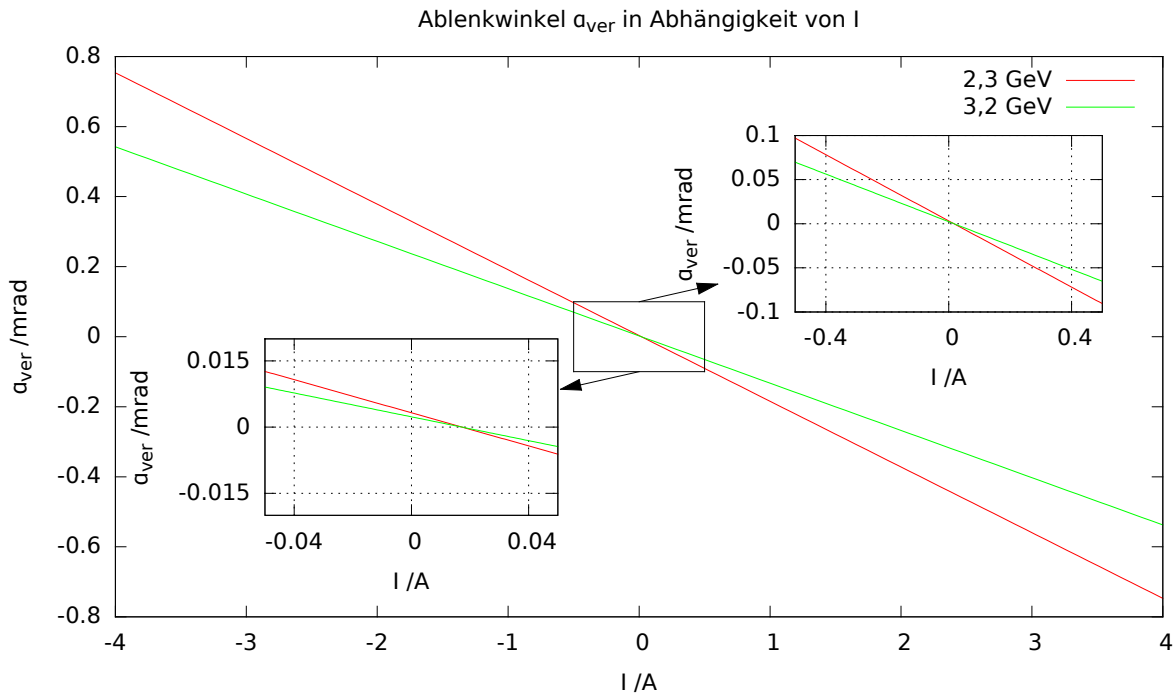


Abbildung 4.11.: Der Graph zeigt den Ablenkwinkel  $\alpha_{\text{vertikal}}$  in Abhängigkeit von der Stromstärke.

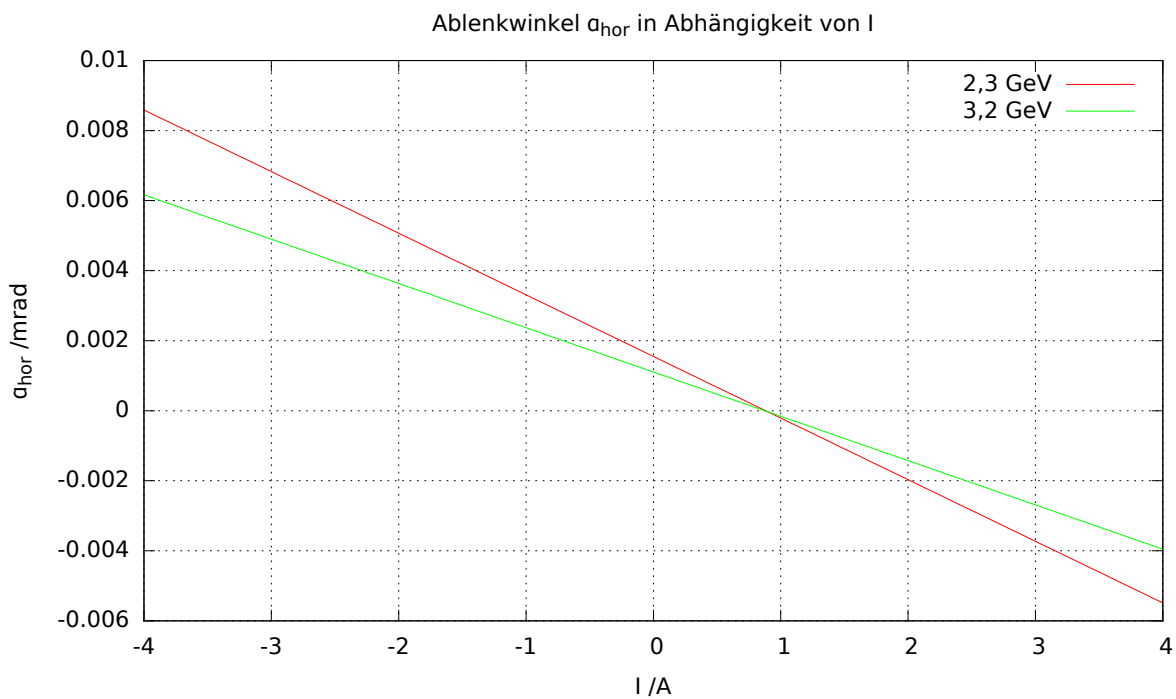


Abbildung 4.12.: Der Graph zeigt den Ablenkwinkel  $\alpha_{\text{horizontal}}$  in Abhängigkeit von der Stromstärke.



In der Vergrößerung kann man erkennen, dass für die vertikale Komponente ein Offset von etwa  $I_{Offset}^{ver} = 0,018 \text{ A}$  entstanden ist. Idealerweise würde die Gerade bei  $I = 0 \text{ A}$  einen y-Achsen-Abschnitt von  $0 \text{ mrad}$  aufweisen. Der Wert liegt ungefähr in der Größenordnung des Fehlers der Stromstärke  $\Delta I_{max} = \pm 0,009 \text{ A}$ . Er kommt dadurch zu Stande, dass durch eine Verschiebung des Nullpunktes bei der Hysteresekurve (siehe Kapitel 3.1.1) die Stromstärke mit einem zusätzlichen Fehler behaftet ist. Dieser Offset ist in allen Messungen vorhanden. Er liegt allerdings, abhängig von der Teilchen-Energie, nur im Bereich einiger  $\mu\text{rad}$ , so dass er keinen erheblichen Einfluss aufweist. Auch bei der horizontalen Komponente gibt es einen Offset. Dieser liegt bei  $I_{Offset}^{hor} = 1 \text{ A}$ . Allerdings sieht man hier, dass der horizontale Ablenkwinkel um fast einen Faktor 100 kleiner ist als der Vertikale, so dass er vernachlässigt werden kann.

Für den Betrieb an ELSA wird die benötigte Stromstärke als Funktion eines gewünschten Winkels  $\alpha_{\text{vertikal}}$  berechnet. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit ergibt sich:

$$I(\alpha_{\text{vertikal}}, E) = \frac{\alpha_{\text{vertikal}} E - (7,5 \cdot 10^{-3} \text{ GeV} \pm 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ GeV})}{(-431,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{GeV}}{\text{A}} \pm 0,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{GeV}}{\text{A}})}. \quad (4.21)$$



## 5. Fazit

Die Messungen haben ergeben, dass der Korrektormagnet kaum Hysterese-Effekte aufweist. Die Koerzitiv-Feldstärken sind so gering, dass im Betrieb an ELSA darauf keine Rücksicht genommen werden muss. Der lineare Bereich der Magnetfeldstärke befindet sich ungefähr zwischen den Stromstärken  $I_1 = -4 \text{ A}$  bis  $I_2 = 4 \text{ A}$ . In diesem sind Ablenkwinkel zwischen  $\approx 0,8 \text{ mrad}$  und  $\approx -0,8 \text{ mrad}$  möglich. Betrachtet man den räumlichen Bereich, in dem der closed orbit typischerweise verläuft, ist die integrierte Feldstärke dort annähernd konstant. Auf Grundlage der in dieser Arbeit ermittelten Messwerte lässt sich nun, für einen gewünschten Ablenkwinkel und eine bestimmte Energie der Teilchen, die benötigte Stromstärke zur Korrektur berechnen.



# A. Anhang

## A.1. Tabellen

Parameter	Wert
Gapbreite $h$	120 mm
Eisenlänge $l_{\text{Fe}}$	150 mm
effektive Feldlänge $l_{\text{eff}}$	257 mm
Windungszahl $n$	556
Induktivität $L$	170 mH
Drahtdurchmesser $d_{\text{Cu}}$	3,00 mm
Widerstand $R(25\text{ }^\circ\text{C})$	ca. $0,7\ \Omega$
Zeitkonstante $\tau = L/R(25\text{ }^\circ\text{C})$	ca. 243 ms
max. Dauerstrom $I_{\text{max}}(1,2\ \text{A}/\text{mm}^2)$	8,48 A
Strom $I_{4500}$ für 4500 Amperewindungen	8,09 A
Magnetfeld $B$ bei $I_{4500}$	37,8 mT
Integrierte Feldstärke $\int B_x(s)ds$	9,72 mT m
Masse $m$ (Joch mit Spule und Befestigungsklemmen)	ca 33 kg

Tabelle A.1.: Übersicht der Daten eines Korrektormagneten [Bal03].

## A.2. Bilder

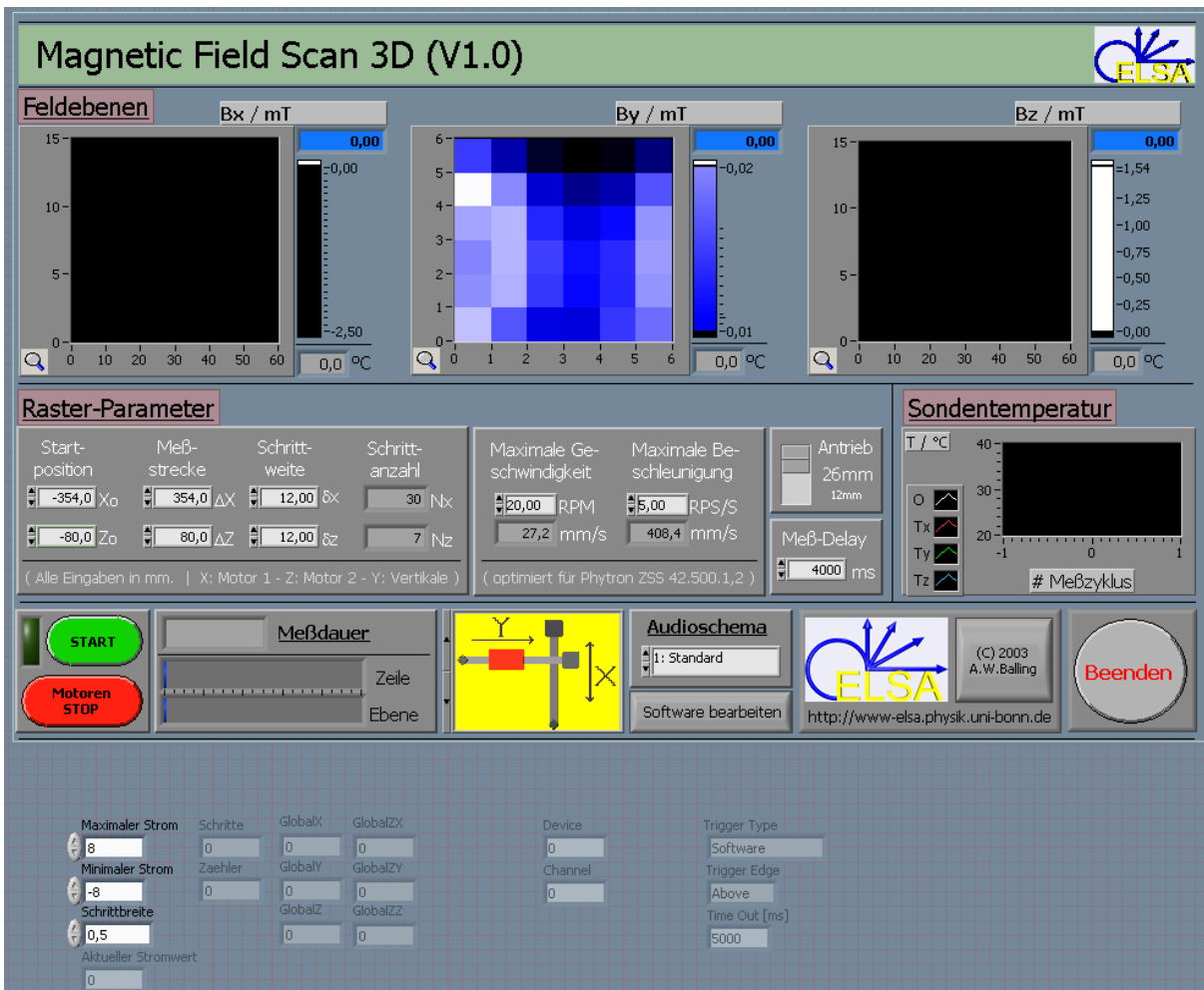


Abbildung A.1.: Benutzeroberfläche der LabView-Implementation mit eingestellten Werten für die Messung.

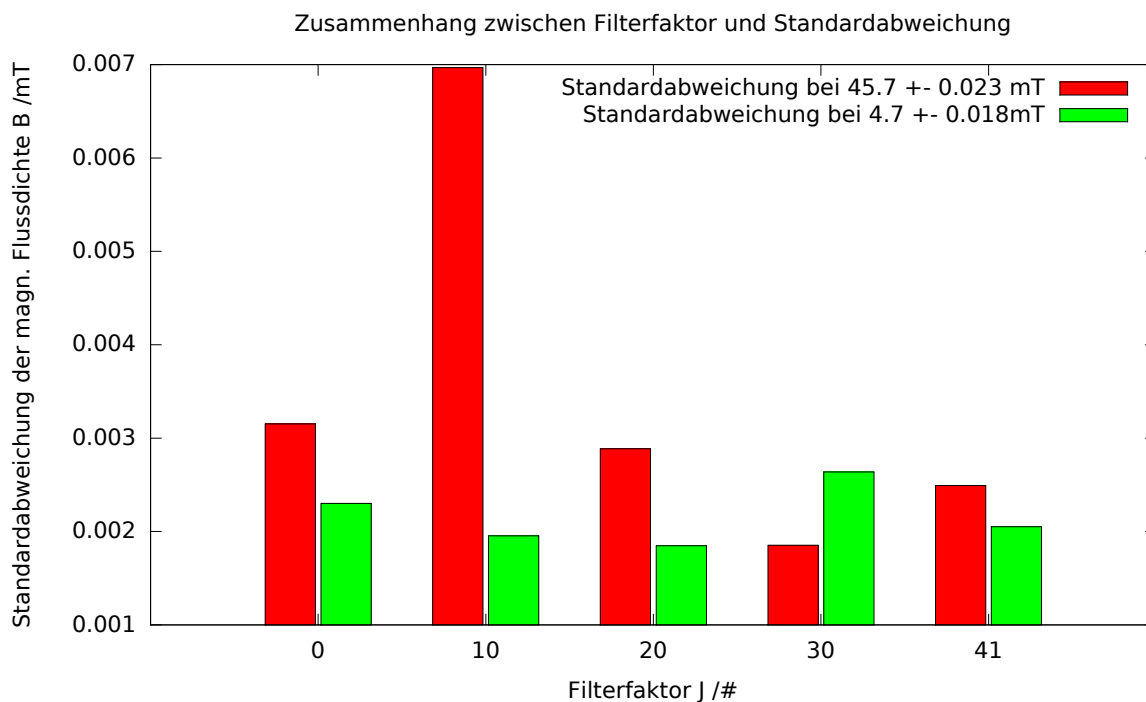


Abbildung A.2.: Verlauf der Standardabweichung in Abhängigkeit vom Filterfaktor.

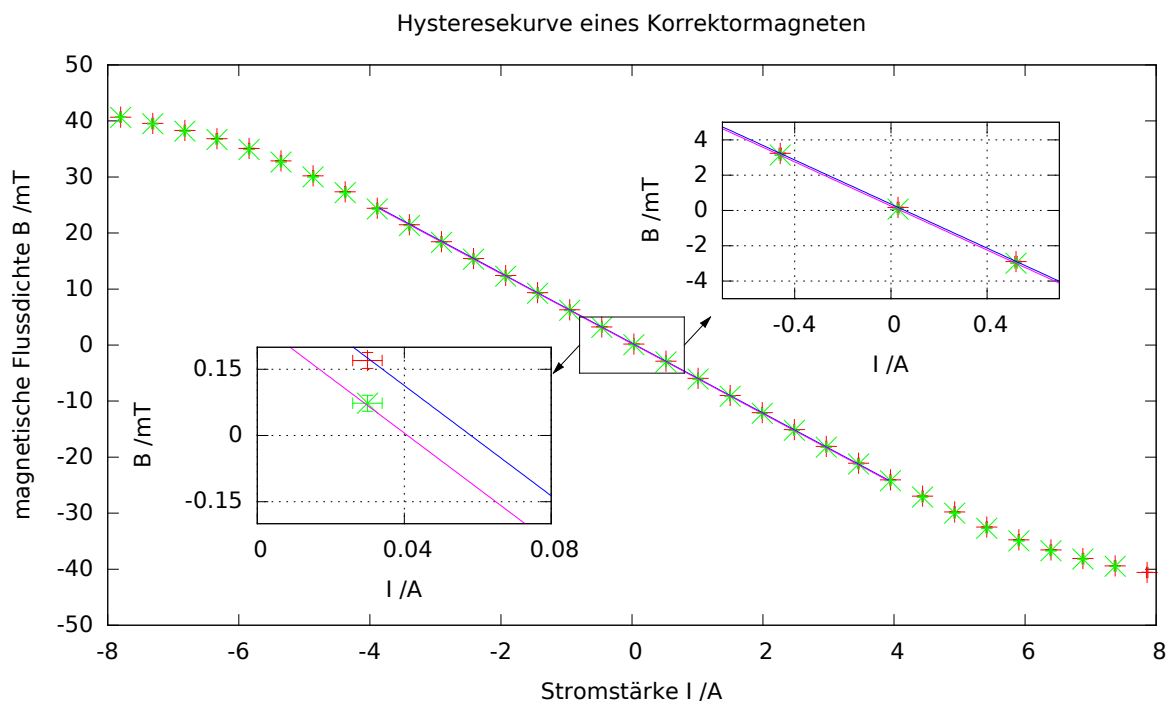


Abbildung A.3.: In der Abbildung ist die Hysteresekurve des Magneten dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Nullpunkt nicht im Ursprung liegt. Dies führt zu einem zusätzlichen systematischen Fehler, der jeden Wert der Messung beeinflusst.

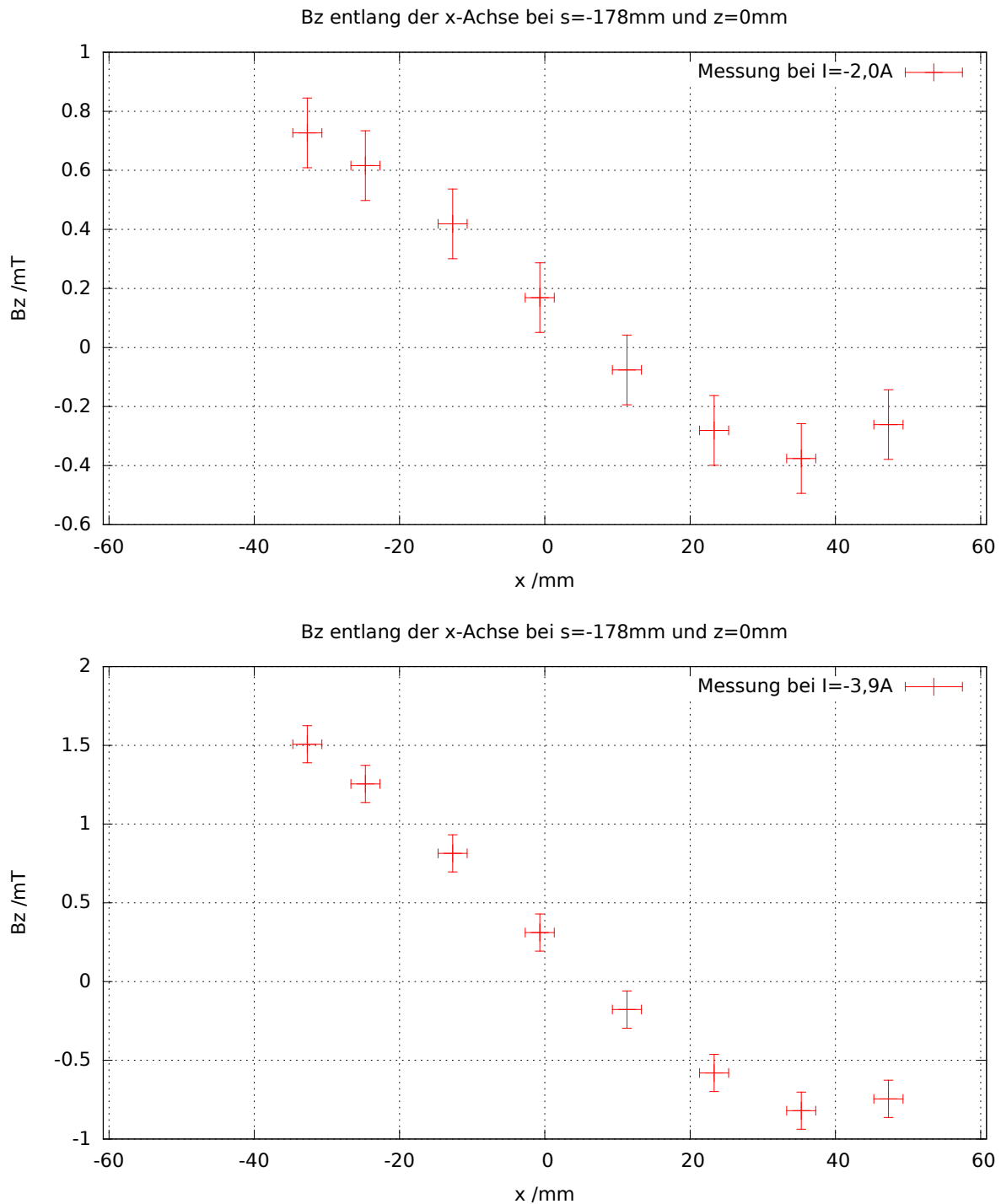


Abbildung A.4.: Die Graphen zeigen den Verlauf von  $B_z$  in Abhängigkeit der x-Position bei  $I_1 = -2,0$  A und  $I_2 = -3,9$  A.



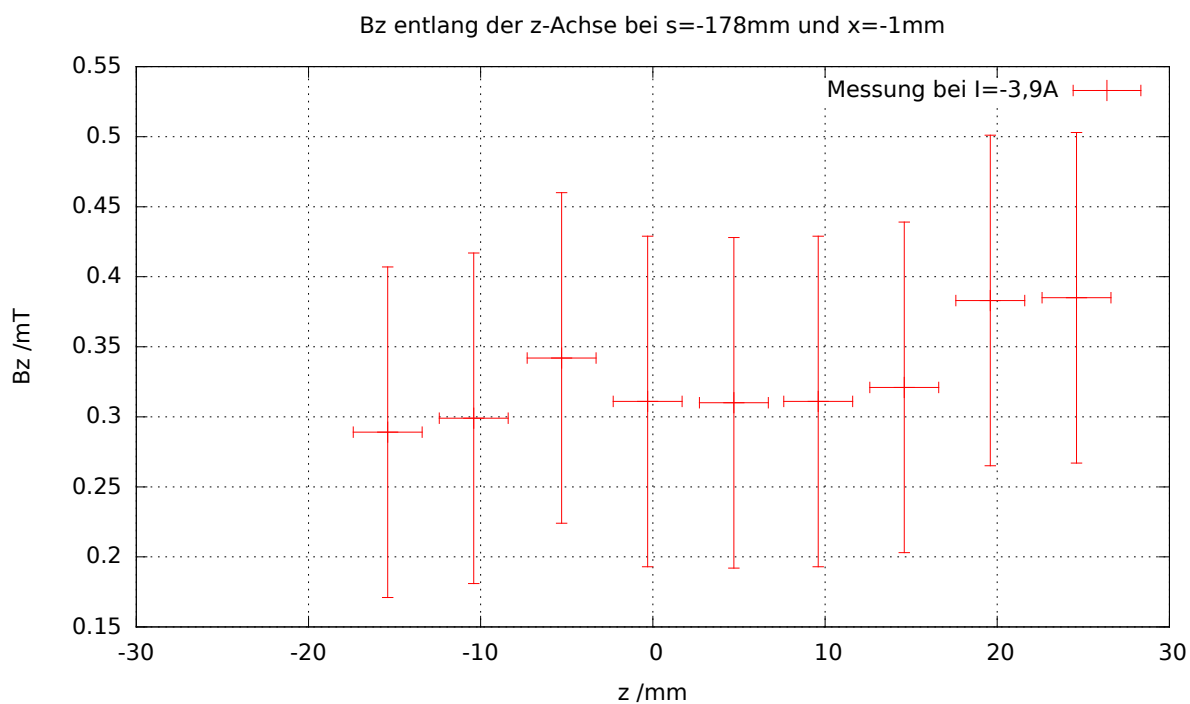
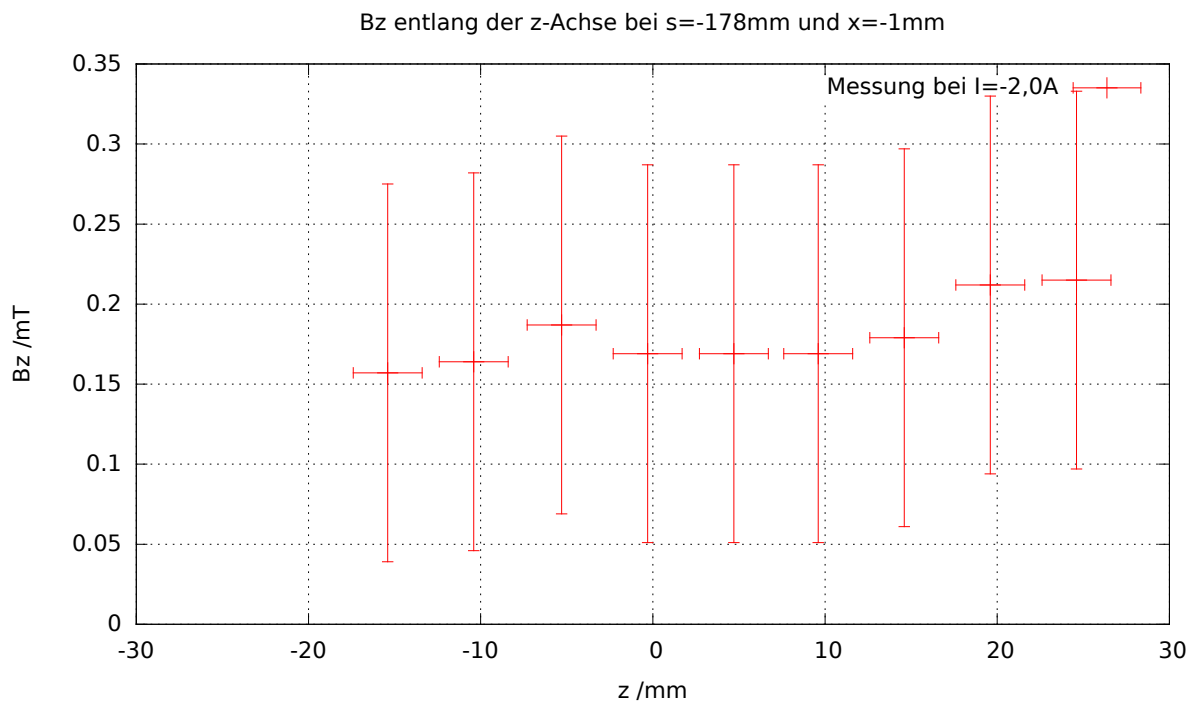


Abbildung A.5.: Die Graphen zeigen den Verlauf von  $B_z$  in Abhängigkeit der z-Position bei  $I_1 = -2,0$  A und  $I_2 = -3,9$  A.

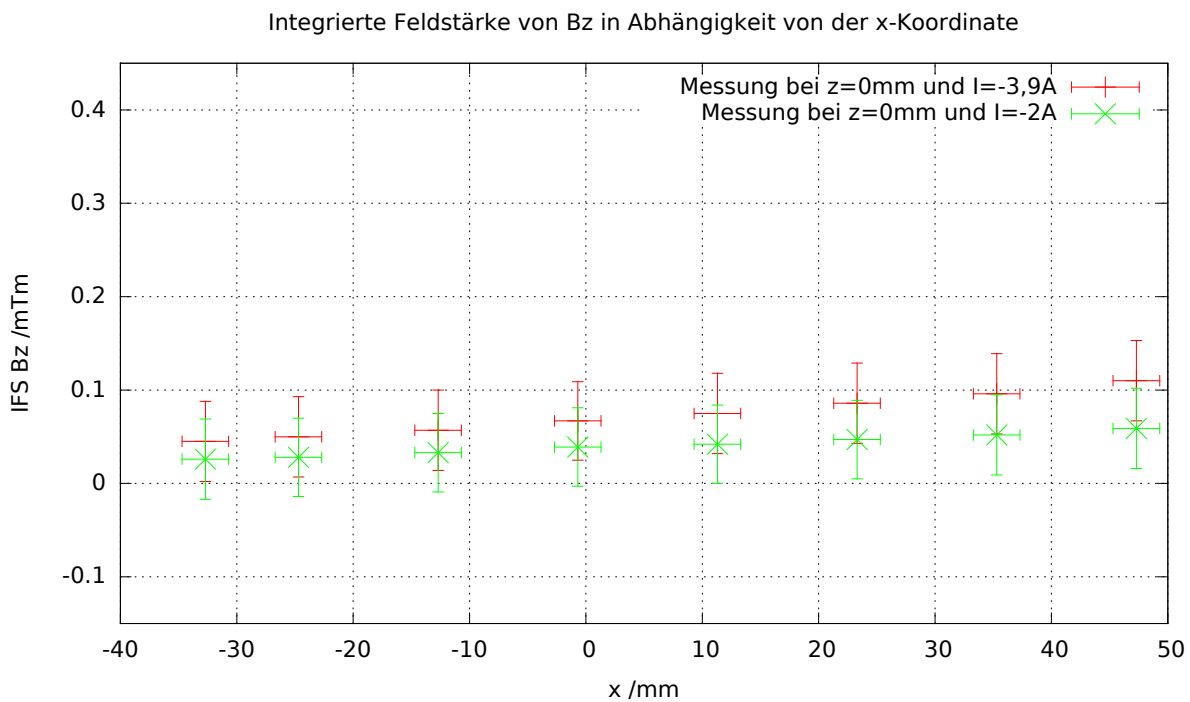


Abbildung A.6.: Der Graph zeigt die integrierte Feldstärke von  $B_z$  in Abhängigkeit der x-Position bei  $I_1 = -2,0\text{ A}$  und  $I_2 = -3,9\text{ A}$ .

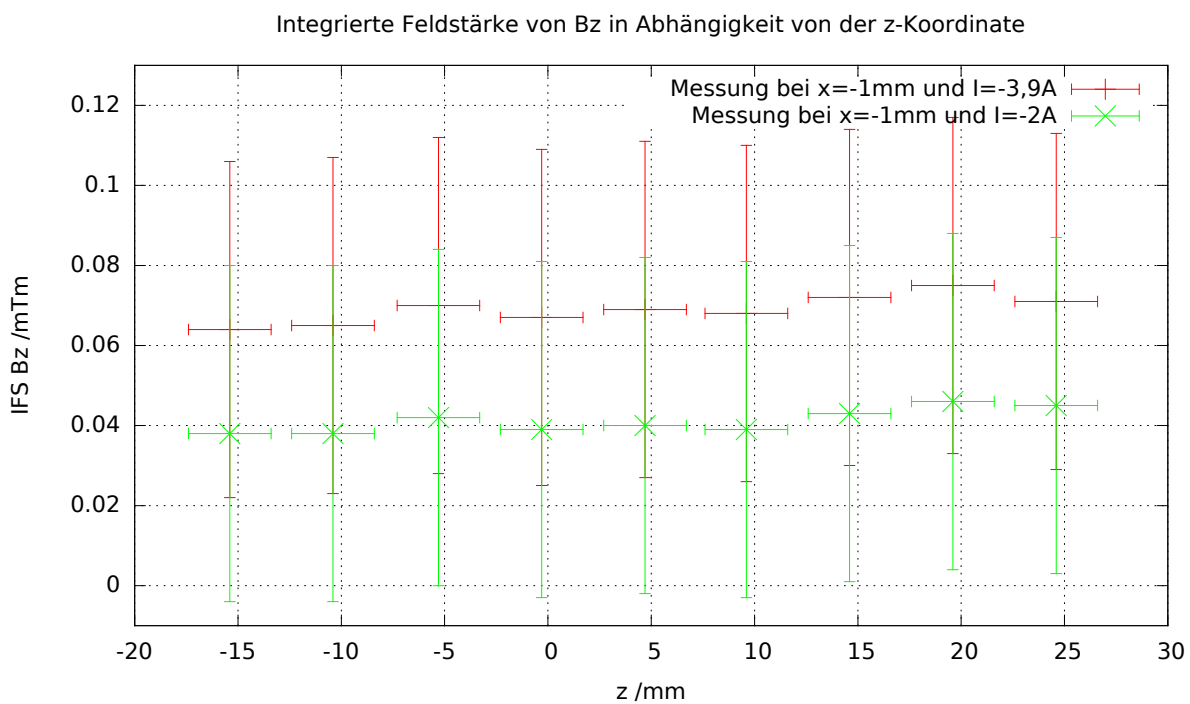


Abbildung A.7.: Der Graph zeigt die integrierte Feldstärke von  $B_z$  in Abhängigkeit der z-Position bei  $I_1 = -2,0\text{ A}$  und  $I_2 = -3,9\text{ A}$ .

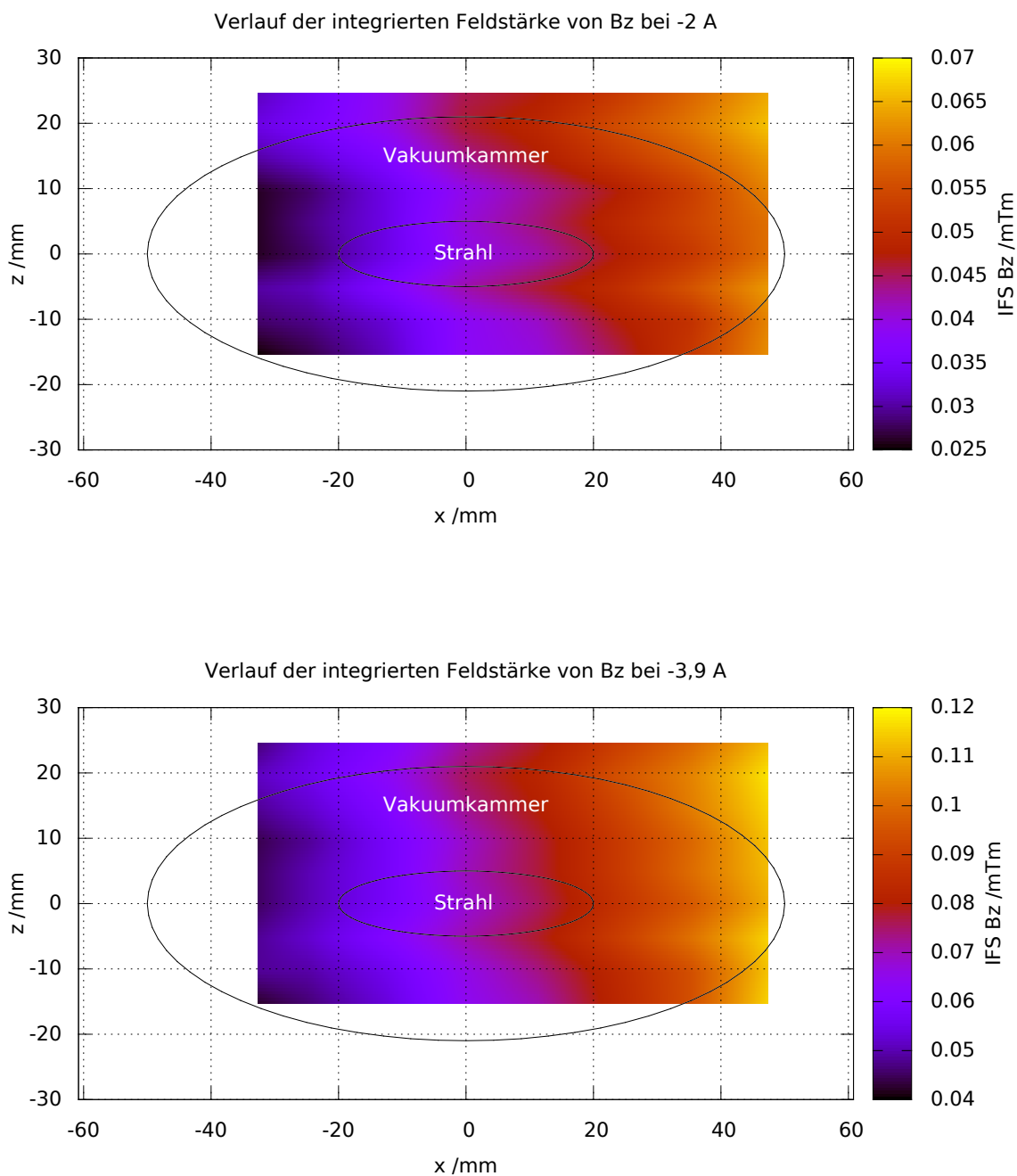


Abbildung A.8.: Die Graphen zeigen die integrierte Feldstärke von  $B_z$  in Abhängigkeit der x- und z-Position bei  $I_1 = -2,0$  A und  $I_2 = -3,9$  A.



# Literaturverzeichnis

- [Bal03] BALLING, Andreas: *Entwicklung und Bau eines Magnetprototypen für das ELSA-Korrektorsystem*, Universität Bonn, Diplomarbeit, Oktober 2003
- [Die] DIECKMANN, A.: Fast Ramping Arbitrary Waveform Power Supplies for Correction Coils in a Circular Electron Accelerator. In: *Proceedings of IPAC2012*
- [ELS] Website der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA. <http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/>,
- [Gro] GROUP3 (Hrsg.): *DTM-151 Digital Teslameter with serial communications - User's manual*. Group3
- [Kei00] KEIL, Joachim: *Messung, Korrektur und Analyse der Gleichgewichtsbahn an der Elektronen-Stretcher-Anlage ELSA*, Universität Bonn, Diss., July 2000
- [K.W96] K.WILLE: *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*. 2. Stuttgart : B.G. Teubner, 1996
- [Sch12] SCHMIDT, Jan F.: *Modellierung der Spindynamik zur Untersuchung von Imperfektionsresonanzen*, Universität Bonn, Masterarbeit, Oktober 2012
- [Thi11] THIRY, Jens P.: *Mikrocontrollerbasierte Regelung der Hochfrequenzamplitude des ELSA Booster-Synchrotrons*, Universität Bonn, Diplomarbeit, Juni 2011
- [Wes] Website des Herstellers für Hall-Sonden-Halter. <http://www.westlakemeter.com/Product/Group/Probe%20Holders.pdf>,
- [WH] W. HILLERT, R. M.: *Vorlesung: Accelerator Physics*. <http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/>,



# Erklärung

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

Unterschrift:

Ort, Datum:





# Danksagung

Um der Gefahr zu entgehen, Jemanden unerwähnt zu lassen, danke ich der gesamten ELSA-Arbeitsgruppe, die mir unglaublich hilfsbereit jede Frage, die mir einfiel, beantworten konnte. In den 4 Monaten traten einige Probleme bei den Messungen auf, die mit Hilfe aller Mitarbeiter und deren individuellem Fachwissen sehr kompetent gelöst werden konnten. Jens-Peter Thiry, Jan Schmidt und Dennis Proft danke ich für ihre Geduld bei den zahlreichen Korrekturen. Ohne diese Unterstützung und Hilfestellungen wäre es kaum möglich gewesen eine solche Arbeit auf die Beine zu stellen.

Insbesondere gilt mein Dank Herrn Dr. Hillert, der es überhaupt ermöglichte, dass ich am Projekt ELSA mitarbeiten durfte, sowie Herrn Dingfelder, der in letzter Minute, ohne zu zögern, die Rolle des zweiten Gutachters übernahm. Ich wurde als ein vollwertiges Mitglied in die Arbeitsgruppe integriert und hatte eine zwar eine sehr stressige, aber lehrreiche und schöne Zeit.

Insbesondere danke ich meiner Freundin, die mir während dieser Zeit tatkräftig zur Seite stand, sowie meiner Familie, die mir das Studium erst ermöglichte.

**Danke!**