



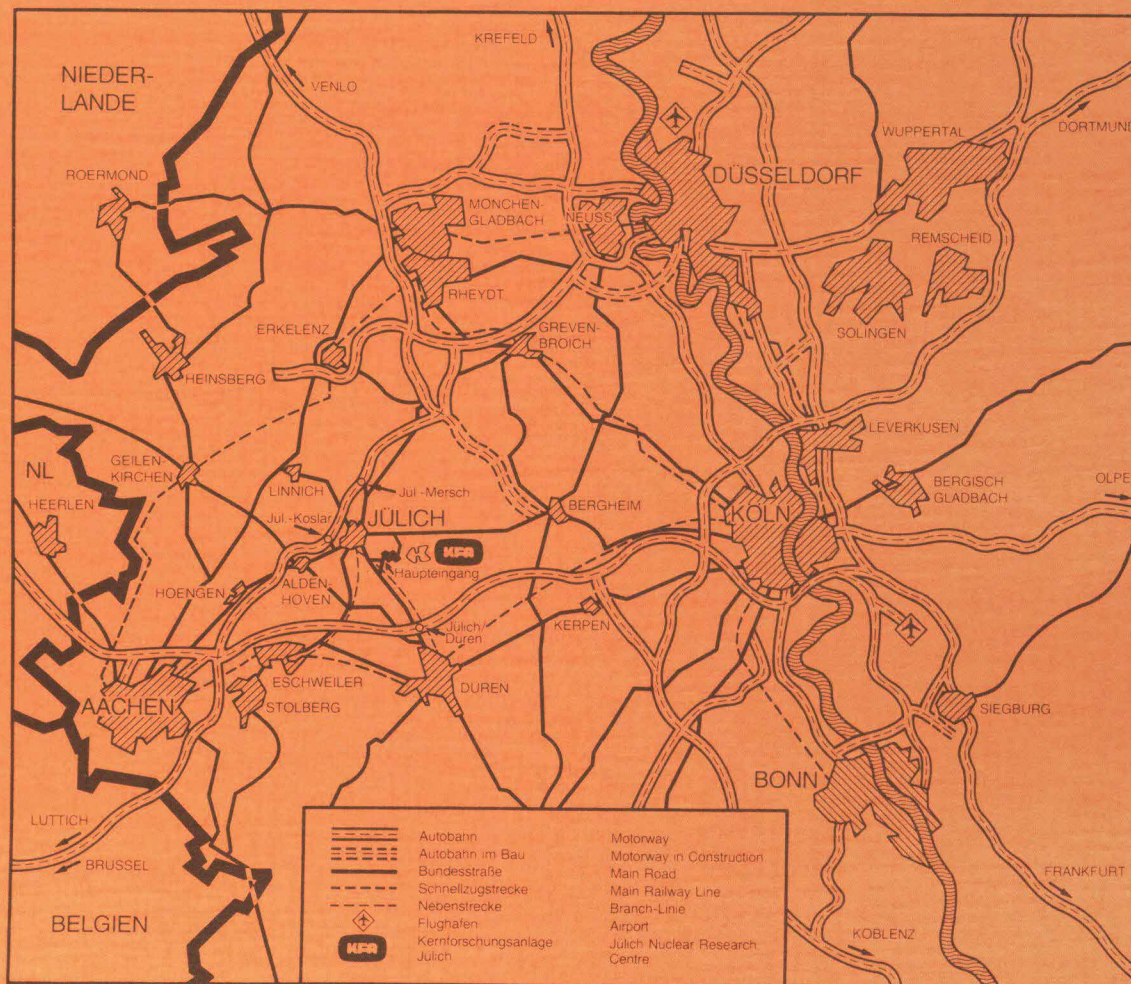
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Schicht- und Ionentechnik
Arbeitsgruppe COSY

**Aufbau und Inbetriebnahme
einer Dipolfeldmeßmaschine**

von
Guido Decker

Jül-Spez-518
August 1989
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 518

Institut für Schicht- und Ionentechnik

Arbeitsgruppe COSY Jül-Spez-518

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 19 13 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 02461/610 · Telex: 833 556-0 kf d

Aufbau und Inbetriebnahme einer Dipolfeldmeßmaschine

von

Guido Decker

Zusammenfassung

Die magnetischen Kenndaten der COSY-Dipole (*Magnetisierungskurve, Betrag des Magnetfeldes, Ablenkstärke, effektive Länge, Feldverteilung und Multipolzusammensetzung*) werden mit vier Spulen, Integratoren, einer Kernspinresonanzsonde und zwei Lineartischen zur Positionierung der Spulen bestimmt. Dazu werden die Spulen entweder gedreht, mit den Tischen verfahren oder das Magnetfeld geändert.

Alle Geräte werden von einem UNIX-Rechner aus gesteuert. Durch ein modular aufgebaute Meßprogramm werden menügesteuert alle Meßdaten automatisch erfaßt, ausgewertet und verwaltet.

Die Abschätzung der Meßgenauigkeit (Bereich 10^{-4}) und der Test der einzelnen Geräte zeigen, daß die geforderten Meßgenauigkeiten der Dipolkenngößen erreichbar sind.

Inhaltsverzeichnis

1	AUFGABENSTELLUNG UND UMFELD	1
1.1	COSY	1
1.2	Ablenkmagnete	3
1.3	Aufgabenstellung	5
1.4	Führer durch die Arbeit	6
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1	Grundlegende Begriffe	7
2.1.1	Magnetische Felder	7
2.1.2	Magnetisierungskurve	8
2.1.3	Effektive Länge	8
2.1.4	Magnetische Steifigkeit	8
2.1.5	Sagitta	10
2.1.6	Multipole und Koordinatensysteme	10
2.2	Multipoldarstellung	12
2.2.1	Potentiale	12
2.2.2	Entwicklung nach Multipolen	14
2.2.3	Symmetriebetrachtung	14
3	THEORIE DER MESSMETHODEN	16
3.1	Kernspinresonanzsonde	16
3.2	Feldmeßspule	18
3.2.1	Darstellung des Induktionsgesetzes	18
3.2.2	Gesamter Feldbereich	22
3.2.3	Homogener Feldbereich	22
3.3	Hallsonde	23
4	MESSVERFAHREN	25
4.1	Magnetisierungskurve	25
4.2	Feldkarte	26
4.3	Spulenflip	27
4.4	Spulenanordnung	28

5	MESSAUFBAU	30
5.1	Überblick über die Spulengeometrie	30
5.1.1	Spulenträger	31
5.1.2	Spulensatz	35
5.1.3	Spulen	37
5.1.4	Spulenkalkulation	37
5.1.5	Bezeichnung der Spulen	38
5.1.6	Spulenträgerkoordinaten	38
5.1.7	Orientierung des Spulenträgers	38
5.1.8	Steckverbindungen, Kabel	39
5.2	Kompensationsspulen	40
5.3	Positioniervorrichtung	41
5.3.1	Zweiachsenteische	41
5.3.2	Tischsteuerung	42
5.3.3	Sicherheitsschleife	45
5.4	Systemvoltmeter	49
5.4.1	Kennzeichen der Systemvoltmeter	49
5.4.2	Spannungsintegration	49
5.4.3	Korrektur der Spannungsintegration	50
5.4.4	Fehlerbetrachtung der Korrekturen	51
5.5	Strommessung	52
5.6	Kernspinresonanzsonde	53
5.7	Hallsonde	54
5.8	Computerumgebung	55
6	PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN	56
6.1	Programmierungumgebung	56
6.2	Programmierrichtlinien	57
6.3	Programmstruktur	58
6.4	Meßvorbereitungen	59
6.4.1	Spulendaten	59
6.4.2	Einjustierung der Spulen in den Magneten	59
6.4.3	Initialisierung der Systemvoltmeter	59
6.5	Messungen	60
6.5.1	Messung der Magnetisierungskurve	60
6.5.2	Messung der Feldkarte	61
6.5.3	Messung mit Kernspinresonanzsonde	62
6.6	Datenauswertung	63
6.6.1	Formen der Auswertung	63
6.6.2	Auswertung der Magnetisierungskurve	64
6.6.3	Auswertung der Feldkarte	65
6.6.4	Polynomfits für Multipolentwicklung	68
6.7	Datenverwaltung	71

6.7.1	Dateibaum	71
6.7.2	Namen der Meßdatendateien	72
6.7.3	Aufbau der Dateien	73
6.7.4	Datensicherung	74
7	MESSGENAUIGKEIT	76
7.1	Toleranzvorgaben	76
7.2	Auflösung	76
7.2.1	Auflösung in der Feldkarte beim Verschieben der Spulen	77
7.2.2	Auflösung in der Erregungskurve	78
7.2.3	Auflösung im Spulenflip	79
7.2.4	Zahlenbeispiele der Auflösung	79
7.3	Fehlerbetrachtungen	79
7.3.1	Fehlermöglichkeiten	79
7.3.2	Fehler im magnetischen Fluß	86
7.3.3	Fehler in den Feldgrößen aus den Messungen der Magnetisierungskurve	90
7.3.4	Fehler in den Feldgrößen der Feldkarte	93
8	TEST DER MESSANORDNUNG	97
9	LITERATURVERZEICHNIS	99
10	ANHANG	102
10.1	Ablaufdiagramme	103
10.2	Magnetdaten	109
10.3	Spulendaten	110
10.4	Tischsteuerungsdaten	112

Kapitel 1

Aufgabenstellung und Umfeld

1.1 COSY

Zur Zeit wird in der KFA Jülich das **Cooler Synchrotron COSY** aufgebaut [COSY 86, MaKu 88]. Es dient zunächst als Strahlenquelle von Protonen und später von leichten Ionen, polarisierten Protonen und Deuteronen. COSY übernimmt sowohl die Aufgabe, die Protonen von 40 MeV auf eine Energie bis maximal 2,5 GeV zu beschleunigen als auch die Teilchen zu speichern. In diesem Speicherbetrieb bleibt der Strahl ohne Beschleunigung auf seiner Umlaufbahn. Währenddessen kann der Phasenraum des Strahls im unteren Energiebereich durch Kühlung an einem kalten Elektronenstrahl und durch stochastische Kühlung im oberen Energiebereich verkleinert werden. Dadurch steigt die Energieauflösung und die Luminosität für die Experimente an externen und internen Targets.

COSY soll Antworten auf Fragen der Kern- und der Mittelenergiephysik geben. Im Mittelpunkt steht dabei die starke Wechselwirkung, die bei höheren Energien zu angeregten Nukleonen im Nukleonenverband führt. In einer Vielzahl von Experimenten soll die Wirkung dieser Kraft sichtbar werden [Oele 87, Berg 85, Ture 88].

Für den Einbau des Elektronenkühlers und interner Targets ist die eigentliche kreisförmige Synchrotronstruktur um zwei gerade Sektionen erweitert worden (Abbildung 1.1). Die Protonen werden als H_2^+ oder H^- vom Isochron-Zyklotron JULIC auf eine Energie von 40 MeV pro Nukleon vorbeschleunigt. Durch eine Umladefolie hindurch werden sie als H^+ in den Ring injiziert.

Das bisher an JULIC benutzte Spektrometer BIG KARL [Karl 83] wird an COSY angeschlossen.

KAPITEL 1. AUFGABENSTELLUNG UND UMFELD

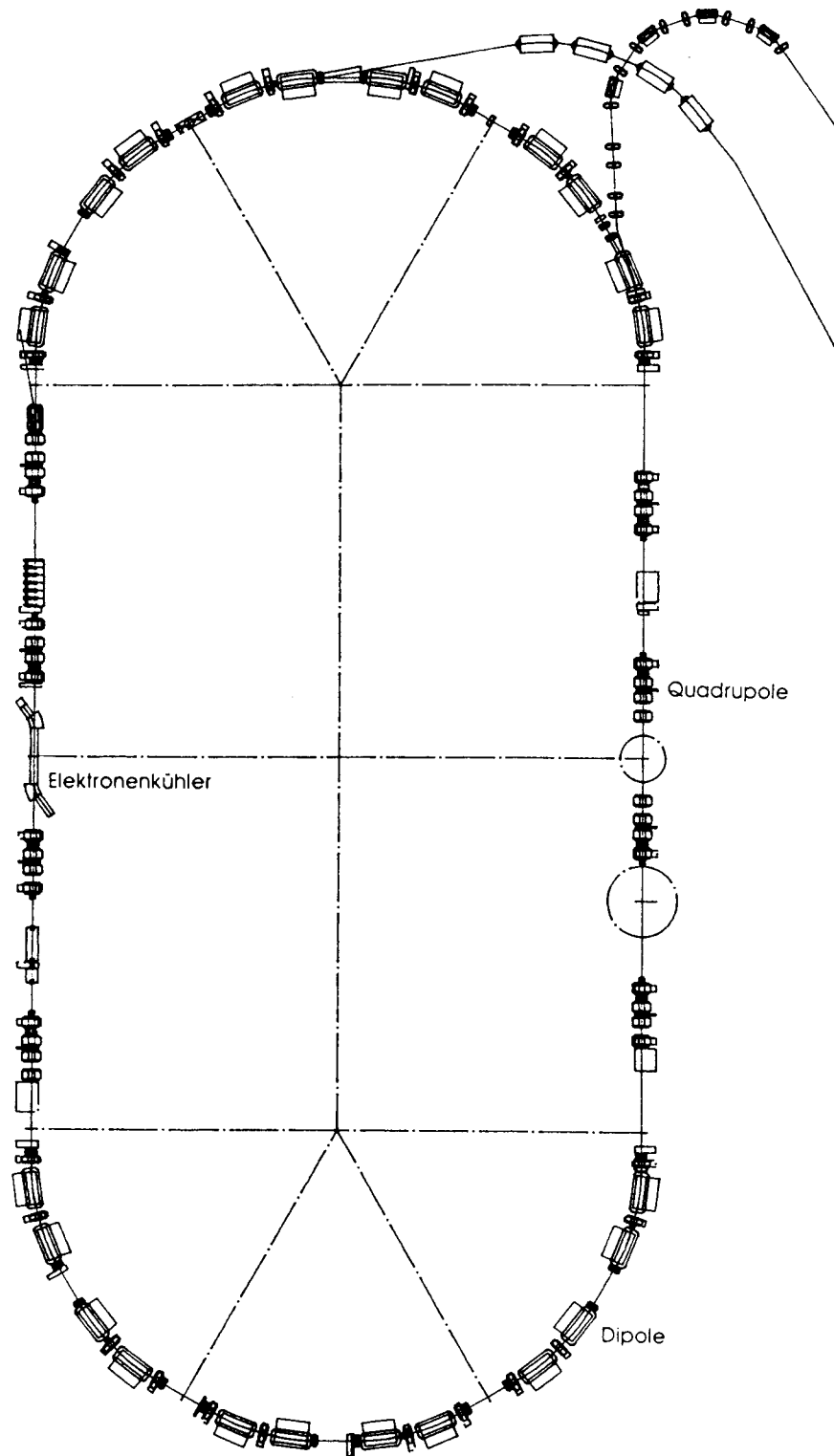


Abbildung 1.1: Aufbau des Beschleunigers und Speicherringes COSY mit einigen seiner Hauptkomponenten.

KAPITEL 1. AUFGABENSTELLUNG UND UMFELD

1.2 Ablenkmagnete

Einen wesentlichen Teil von COSY bilden die 24 Ablenkmagnete [EPAC 88]. Geladene Teilchen beschreiben auf Grund der Lorentzkraft in einem homogenen magnetischen Dipolfeld, das senkrecht auf der Teilchengeschwindigkeit steht, eine Kreisbahn. Mit solch einem Feld wird der Strahl auf seiner Umlaufbahn gehalten.

Im COSY-Ring sind die Ablenkmagnete¹ konventionelle Elektromagnete. Das magnetische Feld wird mit zwei Hauptspulen erzeugt und durch ein Eisenjoch geleitet. Der Querschnitt des Joches erinnert an ein großes C, weshalb der Magnettyp auch als C-Dipol bezeichnet wird (Abbildung 1.2). Das Eisenjoch besteht aus einzelnen, gegeneinander elektrisch isolierten Blechen, um Wirbelströme während der Beschleunigungsphase gering zu halten. Um das Rückflußjoch ist eine Spule zur Feldkorrektur gewickelt.

Einige wichtige Daten zu den Dipolen sind in der Tabelle 10.1 auf Seite 109 aufgeführt.

¹Die Ablenkmagnete werden auch einfach als Dipole bezeichnet.

KAPITEL 1. AUFGABENSTELLUNG UND UMFELD

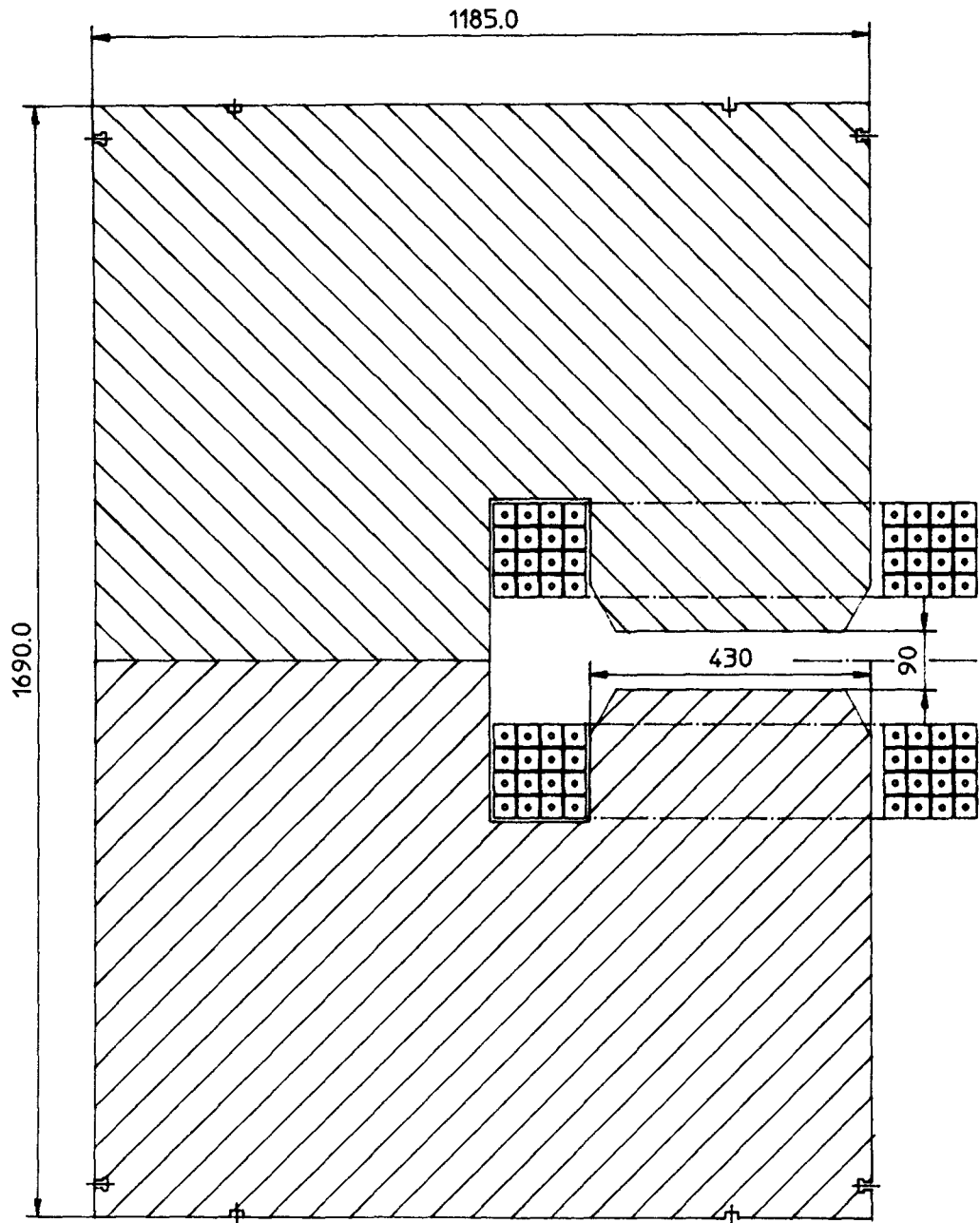


Abbildung 1.2: Querschnitt durch einen COSY-Ablenkmagneten

KAPITEL 1. AUFGABENSTELLUNG UND UMFELD

1.3 Aufgabenstellung

Die wesentlichen Kenndaten der bei COSY verwendeten Dipole müssen bekannt sein. Ermittelt werden sollen

- die magnetische Induktion in Abhängigkeit des Stromes (magnetische Erregungskurve $B(I)$),
- die Ablenkstärke $\int B dl$,
- die effektive Länge l_{eff} ,
- die relative Feldverteilung $\frac{\Delta B}{B}$,
- die absolute Feldverteilung $B(x, y)$ im homogenen Feldbereich und
- die Feldkomponenten der höheren harmonischen Anteile des Feldes c_n .

Eine solche Apparatur zur Dipolfeldmessung wird in dieser Arbeit beschrieben. Entsprechend den Toleranzen aus der Ionenoptik müssen alle 24 Dipolmagnete in COSY bei identischem Erregerstrom bezüglich $\int B dl$ innerhalb $\pm 2 \times 10^{-4}$ im Bereich $0,18 \dots 2,9$ Tm identisch sein [Hardt 87]. Diese einzuhaltende Toleranz gibt gleichzeitig die Obergrenze der Meßungengenauigkeit an.

Für die Anpassung der Magnete untereinander wird der erste Magnet als Referenz benutzt. An ihn werden dann die restlichen Magnete durch Polschuhkorrekturplatten (Shimplatten) an den Stirnseiten angeglichen. Wegen dieser Anpassung muß häufig gemessen werden. Dies und die große Datenmenge jeder einzelnen Messung macht den Aufbau eines automatisierten Meßsystems nötig.

Die Apparatur muß messen, steuern, auswerten und die Daten verwalten können. Da die Messungen auch von Kollegen durchgeführt werden sollen, die sich nicht mit dem Aufbau der Meßvorrichtung beschäftigt haben, wurde hier der Benutzerführung über Menüs eine besonders große Bedeutung zugemessen und weitreichende Kontrollstrukturen eingebaut.

Die durch die Auswertung der Daten gewonnenen Informationen werden für Strahlspurrechnungen (Raytracingrechnungen) und später für Feldeinstellungen im COSY-Ring benutzt.

Entsprechend den Meßanforderungen werden im Rahmen der Arbeit die für die Messungen verwendeten Geräte ergänzt oder angepaßt.

KAPITEL 1. AUFGABENSTELLUNG UND UMFELD

1.4 Führer durch die Arbeit

Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über Aufbau und Umfang der Arbeit.

In Kapitel 2 werden zum besseren Verständnis der weiteren Arbeit die wesentlichen Magnetfeldgrößen beschrieben.

In Kapitel 3 werden die physikalischen Grundlagen der verwendeten Meßmethoden dargestellt.

Das Kapitel 4 schildert die angewendeten Meßverfahren und die daraus folgenden Argumente für die gewählte Meßspulenordnung.

Das Kapitel 5 “Meßaufbau” enthält neben der Gerätebeschreibung auch die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Erweiterungen.

Das Kapitel 6 zum Meßprogramm ist, nach einem allgemeinen Teil zur Programmierung, nach der chronologischen Reihenfolge eines vollständigen Meßablaufes geordnet.

Unter der Überschrift des Kapitels 7 “Meßungenauigkeit” werden die Meßtoleranzvorgaben, die maximal erreichbare Auflösung und die Fehlerabschätzungen abgehandelt.

Der bisher durchführbare Teil des Testes der Meßanordnung wird im Kapitel 8 geschildert.

Kapitel 9 enthält das Literaturverzeichnis.

Die Arbeit schließt mit einigen Anhängen. Sie enthalten wichtigen Daten für den Benutzer der Meßanordnung.

Um beim Lesen der Arbeit lästiges Blättern zu vermindern sind anstelle von Verweisen auf Gleichungen einige Formeln mehrfach zu finden.

Alle vektoriellen Größen sind mit einem Vektorpfeil bezeichnet. Bei den zugehörigen Beträgen sind die Vektorpfeile weggelassen.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen der für Beschleuniger wichtigen physikalischen Feldgrößen

Zum besseren Verständnis der Meßmethoden und des Meßaufbaus, werden im folgenden die wesentlichen Größen, die einen Magneten kennzeichnen, dargestellt [Broe 86, Halb 69, Halb 76, Holl 88, Mart 89].

2.1 Grundlegende Begriffe

2.1.1 Magnetische Felder

Magnetische Felder werden durch die **magnetische Induktion** $\vec{B}$ und die **magnetische Feldstärke** $\vec{H}$ beschrieben. Im magnetostatischen Fall ist $\vec{H}$ die materialunabhängige Feldgröße, die durch makroskopische Ströme I erzeugt wird. Die magnetische Induktion $\vec{B}$ ist die Größe des magnetischen Feldes, die zu teilchenphysikalischen Berechnungen benötigt wird. Sie setzt sich zusammen aus der magnetischen Feldstärke und den atomaren Dipolen bzw. den Kreisströmen des Mediums. Die Beziehung zwischen diesen Feldgrößen lautet:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

mit

$$\mu = \mu_0 \mu_r.$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ nennt man die Permeabilitätskonstante oder Vakuumpermeabilität, μ_r die relative Permeabilität. Sie ist dimensionslos, material-, richtungs- und feldabhängig. Die SI Einheit der magnetischen Feldstärke ist $\frac{\text{A}}{\text{m}}$, die der Induktion Tesla $1\text{T} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$.

KAPITEL 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1.2 Magnetisierungskurve

Um einen gewünschten Feldwert mit einem Elektromagneten einzustellen, braucht man einen bestimmten Strom. Die Zuordnung Strom zu Magnetfeld heißt **Magnetisierungskurve** oder **magnetische Erregungskurve**. Sie ist wegen der Hysterese von der Reihenfolge, Dauer und Größe der früheren Stromeinstellungen abhängig. Hysterese bedeutet das Zurückbleiben einer Wirkung hinter der sie verursachenden physikalischen Größe. Um reproduzierbar messen zu können, muß eine vorher bestimmte zeitabhängige Reihenfolge von Strömen $I(t)$ eingehalten werden.

2.1.3 Effektive Länge

Zur Berechnung der Strahloptik eines geladenen Teilchens im magnetischen Feld genügt in erster Näherung die Betrachtung von

$$\int_{-\infty}^{\infty} B \, dl$$

entlang der Teilchenbahn, wenn die Wellenlänge der Betatronschwingung sehr viel länger ist als der Feldbereich. Die Wellenlänge dieser Schwingung ist bestimmt durch die Strecke, die ein Teilchenstrahl zurücklegt, während der er einmal um seine Sollbahn oszilliert¹. $\int B \, dl$ nennt man auch **Ablenkstärke**.

Um Magneto-optikrechnungen zu vereinfachen, ersetzt man den wirklichen Feldverlauf durch einen rechteckförmigen Verlauf, das heißt ein konstantes Feld B_0 über die Länge l_{eff} , so daß gilt

$$\int_{-\infty}^{\infty} B \, dl = B_0 l_{eff}$$

(Abbildung 2.1); B_0 ist das Feld in der Mitte des Magneten, und l_{eff} nennt man die **effektive Länge**.

2.1.4 Magnetische Steifigkeit

Der Ablenkwinkel α in Radian ist gegeben durch

$$\alpha = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} B \, dl}{B\rho} = \frac{B_0 l_{eff}}{B\rho}.$$

Darin ist $B\rho$ die **magnetische Steifigkeit** oder die **Strahlsteifigkeit**

$$B\rho = \frac{p}{q}$$

¹Im COSY-Ring ist die Wellenlänge der Betatronschwingung etwa 45m

KAPITEL 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

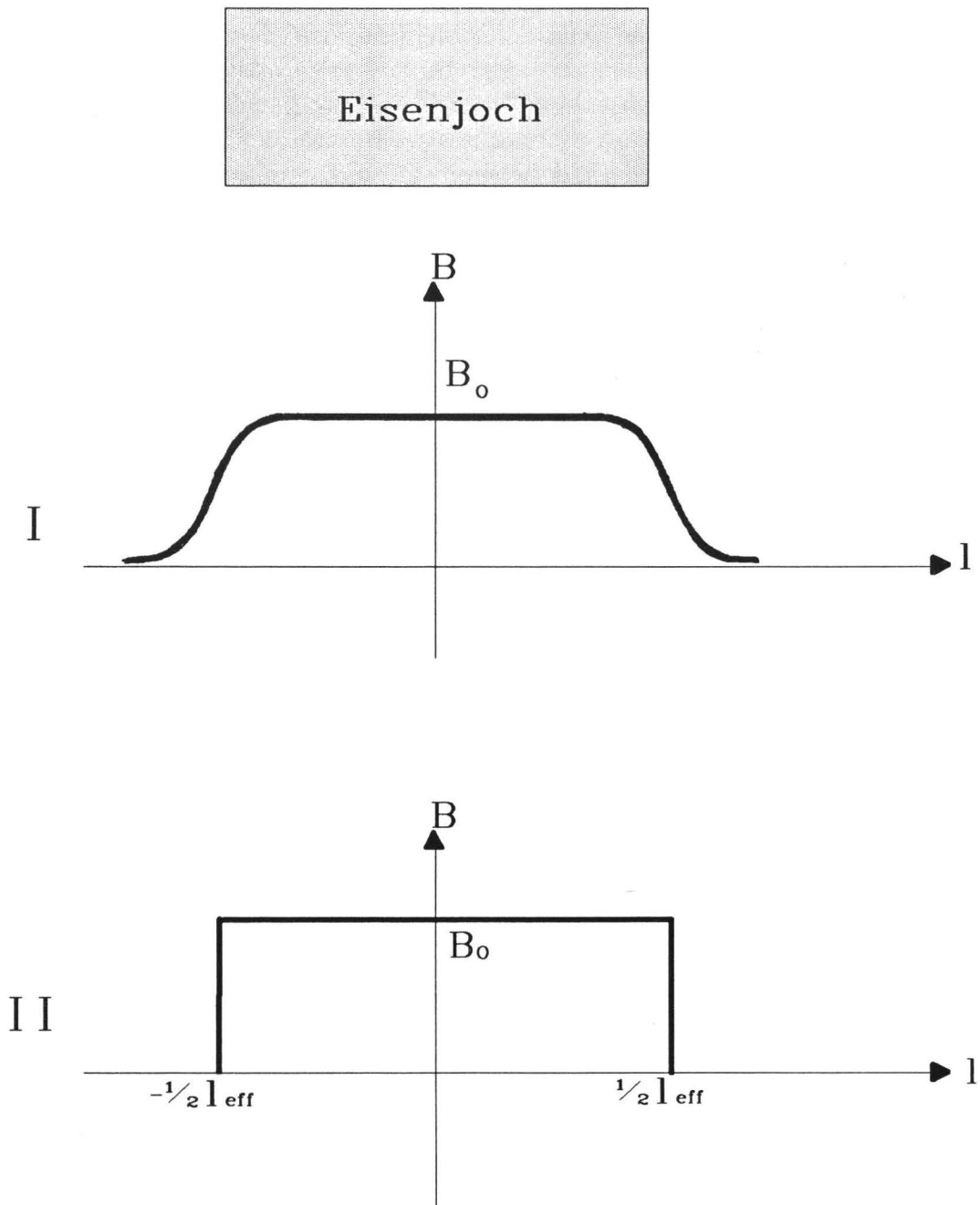


Abbildung 2.1: Kurve I: wirklicher Feldverlauf. Kurve II: Ersatz der Kurve I durch einen rechteckförmigen Feldverlauf der Größe B_0 und der Länge l_{eff}

mit p dem Teilchenimpuls und q der Teilchenladung. Sie leitet sich aus dem Kräftegleichgewicht zwischen der Lorentzkraft $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$ und der

KAPITEL 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Zentrifugalkraft $F = \frac{mv^2}{\rho}$ ab. ρ ist der Ablenkradius.

2.1.5 Sagitta

In einem homogenen Magnetfeld bewegt sich ein geladenes Teilchen auf Grund der Lorentzkraft auf einer Kreisbahn. Den maximalen Abstand d_s zwischen dieser Bahn und ihrer Sekante nennt man **Sagitta**. Sie ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Für sie gilt mit den obigen Bezeichnungen

$$d_s = \rho \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right)$$

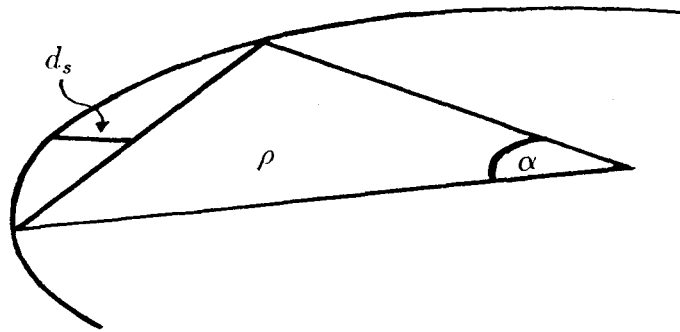


Abbildung 2.2: Sagitta d_s ist der Abstand zwischen einer kreisförmigen Teilchenbahn und ihrer Sekante

2.1.6 Multipole und Koordinatensysteme

Ein Magnet ist durch die Anzahl seiner Pole gekennzeichnet. Die zugehörige **Multipolordnung n** ist die Hälfte der Anzahl der Pole. So hat ein Dipol die Multipolordnung $n = 1$, ein Quadrupol $n = 2$, ein Sextupol $n = 3$, usw. Bei einer Drehung um ein ganzzahliges Vielfaches von $\frac{180^\circ}{n}$ um die Symmetrieachse des Magneten reproduziert er sich bis auf seine Polarität wieder. Diese Drehachse wird im weiteren als Strahlachse bezeichnet. In der Magneto-optik wird sie auch als die z -Achse eines Koordinatensystems definiert. Wegen der Drehsymmetrie wird vornehmlich das Zylinderkoordinatensystem zur Beschreibung von Multipolmagneten benutzt. Dies gilt vor allem für höhere Multipole.

KAPITEL 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die Dipolordnung wird häufig in einem kartesischen Koordinatensystem beschrieben. Üblicherweise legt man den Ursprung des Koordinatensystems in die mechanische Mitte des Polspaltes (Gap). Dann befindet sich die Sollposition des Strahles im Ursprung. Die z -Achse zeigt in Strahlrichtung, die y -Achse zum oberen Pol und die Richtung der x -Achse wird so gewählt, daß ein rechtshändiges Koordinatensystem s vorliegt (Abbildung 2.3).

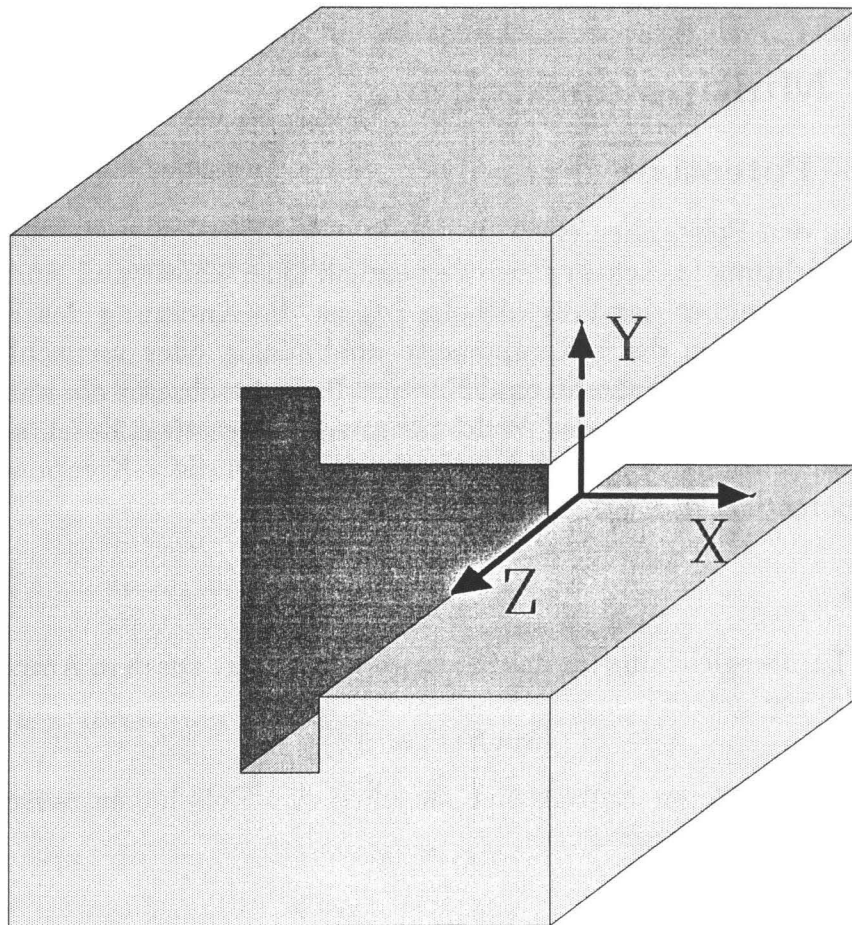


Abbildung 2.3: Festlegung des Koordinatensystems s im Magneten. Der Ursprung liegt in der mechanischen Mitte des Magnetpolspaltes, der der Sollposition des Strahles entspricht.

Im Zusammenhang mit der Ablenkstärke ist es üblich, die z -Achse mit l zu bezeichnen und die effektive Länge l_{eff} und nicht z_{eff} zu nennen. Diese Konvention wird im folgenden beibehalten.

Durch Fertigungstoleranzen, wie zum Beispiel Dichteschwankungen des Magnetjochs oder unsymmetrische Bauweise, kann es vorkommen, daß die

KAPITEL 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

durch die Mechanik gegebene Ebene $z = 0$ die effektive Länge nicht in zwei gleiche Teile trennt. Dann kann man ein zusätzliches Koordinatensystem s' für das magnetische Feld einführen, das als Ebene $z' = 0$ die Ebene besitzt, die die effektive Länge in zwei gleiche Teile trennt. In aller Regel sind die Abstände der beiden Koordinatensysteme gering. Falls nicht ausdrücklich anders erwähnt, ist im folgenden immer das durch die Mechanik festgelegte Koordinatensystem s gemeint.

2.2 Multipoldarstellung

2.2.1 Potentiale

Zwischen den Polschuhen eines strahlführenden Dipolmagneten mit einem in Strahlrichtung (z -Achse) gleichbleibendem Querschnitt und einer Länge, die groß gegenüber der Polspalthöhe ist, ist die Änderung des Feldes in Strahlrichtung von der z -Komponente unabhängig oder vernachlässigbar klein. Da im Polspalt die Stromdichte $\vec{j} = 0$ ist, beschreibt die zweidimensionale Laplacegleichung das zweidimensionale Magnetfeld durch ein skalares zweidimensionales Potential $V(x, y)$ oder durch die z -Komponente des Vektorpotentials $\vec{A}(x, y)$.

Die Laplacegleichung für das Skalarpotential folgt aus dem Ampèreschen Durchflutungsgesetz

$$\text{rot } \vec{H}(\vec{r}) = \vec{j}(\vec{r}).$$

In dem betrachteten Raumgebiet zwischen den Polschuhen verschwindet die elektrische Stromdichte $\vec{j}$.

Dann gilt

$$\text{rot } \vec{H}(\vec{r}) = 0.$$

Für diesen stromfreien Fall kann $\vec{H}$ als Gradienten eines Skalarpotentials V dargestellt werden, da die Rotation eines Gradienten von einem beliebigen Skalar verschwindet [Groß 81].

$$\vec{H} = -\text{grad } V$$

In einem Gebiet, in dem μ_r stückweise konstant ist, gilt nach dem vierten Maxwellschen Gesetz $\text{div } \vec{H} = 0$. Wird das Magnetfeld $\vec{H}$ hier in gleicher Weise ersetzt, so erfüllt das Skalarpotential V die **Laplacegleichung**

$$\text{div grad } V = \Delta V = 0.$$

KAPITEL 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die Laplacegleichung des Vektorpotentials $\vec{A}$ basiert auf dem vierten Maxwellschen Gesetz

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Für ein allgemeines Vektorpotential gilt laut Vektorrechnung $\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{A} = 0$. Wenn μ_r mindestens stückweise konstant ist [Jack 83], kann man $\vec{A}$ so wählen, daß gilt

$$\vec{H} = \operatorname{rot} \vec{A}$$

Wird diese Gleichung in das Ampèresche Durchflutungsgesetz eingesetzt, so erhält man

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{A} - \Delta \vec{A} = \vec{j}$$

Mit der Coulombeichung

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0$$

ergibt sich die **Poissongleichung**

$$\Delta \vec{A} = -\vec{j}$$

Für die Stromdichte im betrachteten Raumgebiet gilt wieder $\vec{j} = 0$. So erhält man die **Laplacegleichung** für das Vektorpotential

$$\Delta \vec{A} = 0.$$

Mit dem komplexen Potential

$$F(\zeta) = A(x, y) + iV(x, y)$$

kann die magnetische Feldstärke in der x,y-Ebene

$$H_\zeta = H_x(x, y) + iH_y(x, y)$$

beschrieben werden, wenn $\vec{A} = A\vec{e}_z$ gilt. $\vec{e}_z$ ist der Einheitsvektor in z-Richtung, F ist eine analytische Funktion in der Variablen

$$\zeta = x + iy$$

(ζ darf nicht mit der z-Koordinate verwechselt werden). Die reellen Potentiale $A(x, y)$ und $V(x, y)$ sind Lösungen der Cauchy-Riemannschen Differentialgleichungen. Wegen $\vec{H} = -\operatorname{grad} V$ und $\vec{H} = \operatorname{rot} \vec{A}$ gilt

$$H_x = \frac{\partial A(x, y)}{\partial y} = -\frac{\partial V(x, y)}{\partial x}$$

KAPITEL 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

$$H_y = -\frac{\partial A(x, y)}{\partial x} = -\frac{\partial V(x, y)}{\partial y}$$

2.2.2 Entwicklung nach Multipolen

Differenziert man das komplexe Potential in der Ebene nach ζ gemäß den Differentiationsregeln

$$\frac{dF(\zeta)}{d\zeta} = \frac{\partial F(\zeta)}{\partial x} = -i \frac{\partial F(\zeta)}{\partial y},$$

so gilt

$$\frac{dF(\zeta)}{d\zeta} = \frac{\partial A(x, y)}{\partial x} + i \frac{\partial V(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial V(x, y)}{\partial y} - i \frac{\partial A(x, y)}{\partial y}.$$

Das Einsetzen der Komponenten der Feldstärke ergibt

$$i \frac{dF(\zeta)}{d\zeta} = H_x - iH_y = H_\zeta^*.$$

$F(\zeta)$ kann man um den Ursprung dieser Ebene in eine Potenzreihe mit den komplexen Multipolkoeffizienten c_n entwickeln

$$F(\zeta) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \zeta^n.$$

Für H_ζ^* gilt dann innerhalb des Konvergenzbereichs

$$H_\zeta^* = i \frac{dF(\zeta)}{d\zeta} = i \sum_{n=0}^{\infty} n c_n \zeta^{n-1}$$

Der Konvergenzbereich reicht vom Ursprung bis maximal zur nächsten Singularität, d.h. bis zum Magnetpol [Halb 76]. Für $n = 0$ wird kein Beitrag zum Magnetfeld geliefert. Daher schreibt man

$$H_\zeta^* = H(x) - iH(y) = i \sum_{n=1}^{\infty} n c_n \zeta^{n-1}.$$

Die Koeffizienten c_n geben die Stärke des Anteils der einzelnen Multipole am Gesamtfeld an.

2.2.3 Symmetriebetrachtung

Für einen unendlich langen, symmetrisch bezüglich einer Drehung um 180° um seine Strahlachse aufgebauten Modelldipol gilt $H_\zeta(x, y) = H_\zeta(x, -y)$, wenn die y -Achse parallel zur Richtung der Flächennormale der Pole des

KAPITEL 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Dipols ist. Dann besteht die Potenzreihenentwicklung für $H_\zeta(x, y)$ nur aus Termen mit geraden Exponenten bis einschließlich $(n - 1)$, das heißt für die Multipolkoeffizienten

$$c_2 = c_4 = c_6 = \dots = 0$$

In solch einem Dipol sind nur Dipolanteile, Sextupolanteile, Dekapolanteile ... erlaubt².

Wegen dieser Symmetrie ist nur die y -Komponente des magnetischen Feldes entlang der x -Achse in der Ebene $y = 0$ von Null verschieden. Diese Ebene nennt man Mittelebene, ein Sonderfall der Mittelfläche. Diese wird als die Fläche definiert, auf der alle Feldlinien senkrecht stehen. Je weniger die Symmetrie ausgeprägt ist, desto komplizierter ist die Form der Fläche. Für die Bestimmung der Multipolanteile genügt eine Messung der y -Komponente in dieser Fläche. Bei einer Integration über die z -Komponente muß an mehreren x -Koordinatenpunkten gemessen werden.

Da es in der Regel nicht möglich ist, einen drehsymmetrischen Modell-dipol herzustellen, werden auch die eigentlich verbotenen Multipolanteile auftreten. Die relative Größe dieser Multipolkoeffizienten ist ein Anhaltspunkt dafür, wie groß die Abweichungen zum Modelldipol sind und ist damit das Maß für die magnetische beziehungsweise ionenoptische Qualität des Magneten.

Für die Entwicklung entlang der x -Achse gilt

$$H_\zeta(x, 0) = - \sum_{n=1}^{\infty} n c_n x^{n-1}.$$

Die c_n sind hier reell. Wird $H_\zeta(x, y)$ an einer anderen Stelle gemessen, so gilt

$$H_\zeta(x, y) = \operatorname{Re} \left(- \sum_{n=1}^{\infty} n c_n \zeta^{n-1} \right).$$

Das Potential ist eine analytische Funktion. Sie läßt somit eine analytische Fortsetzung von gemessenen Punkten an beliebigen Stellen in der komplexen Ebene innerhalb des Konvergenzkreises auf dem ganzen Radius zu. Dort kann die gesamte Feldverteilung berechnet werden, auch wenn nur Werte auf einer Geraden gemessen werden [Wind 70].

²Allgemein gilt für einen $2N$ -poligen Magneten $c_n \neq 0$ für $n = N(2m + 1)$ mit $m = 0, 1, 2, \dots$

Kapitel 3

Theorie der Meßmethoden

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der zu magnetischen Feldmessungen an den COSY-Dipolmagneten benutzten Meßmethoden dargestellt [Wats 65, MaKu 84, Metr 86].

3.1 Kernspinresonanzsonde

In einem äußeren homogenen magnetischen Feld $\vec{B}$ können die Energieniveaus eines Atomkerns mit der Kernspinquantenzahl $\tilde{I}$ in $(2I + 1)$ verschiedene Unterniveaus aufspalten. Mit diesem Kernspin ist ein magnetisches Moment $\vec{\mu}$ verbunden. Der Energieabstand der einzelnen Niveaus beträgt

$$\Delta E = \mu \frac{B}{I}$$

Legt man ein magnetisches Wechselfeld senkrecht zum Hauptfeld an, so induziert man laut den Auswahlregeln

$$\Delta m_I = \pm 1$$

(m_I = magnetische Quantenzahl) Dipolübergänge zwischen den neu entstandenen Energieniveaus. Der Spin klappt um, wenn die Resonanzbedingung

$$\Delta E = -\hbar\omega_L$$

erfüllt ist. Diesen Vorgang nennt man Kernspinresonanz oder Nuclear Magnetic Resonance (NMR) (siehe Abbildung 3.1).

ω_L ist die **Lamorfrequenz**. Für sie gilt

$$\omega_L = -\frac{\mu_I}{\hbar I} B = -\gamma B.$$

Den Proportionalitätsfaktor γ bezeichnet man als gyromagnetisches Verhältnis. Er ist charakteristisch für den jeweiligen Atomkern. Für Protonen

KAPITEL 3. THEORIE DER MESSMETHODEN

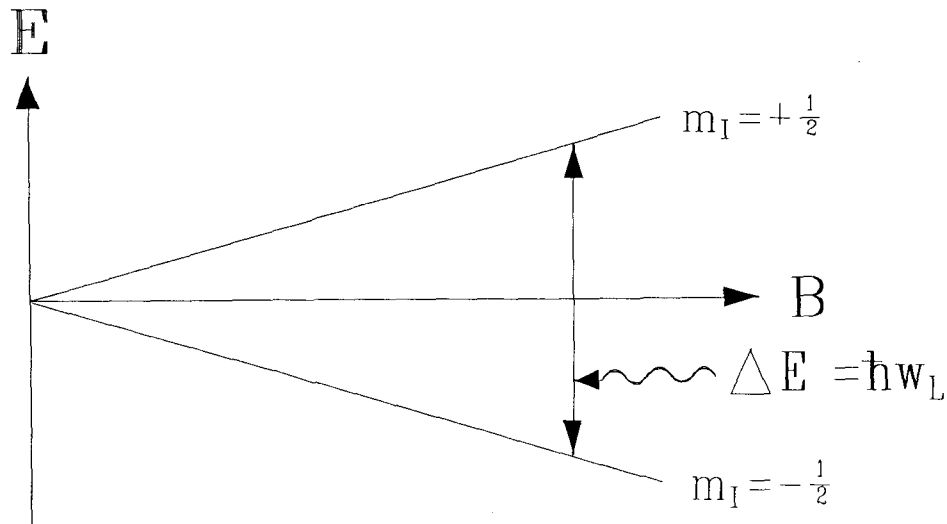


Abbildung 3.1: Die Energieniveaus des Atomkerns spalten sich in Abhängigkeit des magnetischen Feldes auf. Ein Kernspinflip ist durch Strahlungseinfang der Energie $\Delta E = -\hbar\omega_L$ möglich. m_I bezeichnet die magnetische Quantenzahl (hier für ein Proton).

und Deuteronen ist er sehr genau bekannt.

$$\gamma_{\text{Proton}} = 42.57608(12) \frac{\text{MHz}}{\text{Tesla}} \quad \gamma_{\text{Deuteron}} = 6.53569(2) \frac{\text{MHz}}{\text{Tesla}}$$

Weil Frequenzen mit Genauigkeiten besser als 10^{-7} gemessen werden können, wird diese Beziehung benutzt, um homogene und statische magnetische Felder mit hoher Präzision zu bestimmen.

Gemessen wird die Resonanz, indem man eine Wasserprobe in einer kleinen Spule so ins Feld hineinbringt, daß die Spulenachse senkrecht zum Hauptfeld steht. Wasser eignet sich gut für dieses Meßverfahren, da ^{16}O im Gegensatz zu ^1H ($I = \frac{1}{2}$) und ^2H ($I = 1$) kein magnetisches Moment hat. Die Vorzugsrichtung der magnetischen Momente des Wassers richtet sich parallel zum Hauptfeld aus. Die Resonanz ist meßbar, wenn die Niveaus der verschiedenen magnetischen Energien unterschiedlich stark besetzt sind, da sonst keine Netto-Energie zur Besetzung höherer Niveaus mehr aufgenommen werden kann. Die Netto-Energie ist die Differenz zwischen der emittierten und absorbierten Energie. Laut der Boltzmann-Verteilung sind im thermischen Gleichgewicht die Niveaus mit niedrigerer Energie stärker bevölkert als die höherer Energie. Das von außen angelegte Feld induziert Übergänge von den niedrigeren zu den höheren Niveaus. Der Unterschied in den Besetzungszahlen würde verschwinden, wenn nicht die Spin-Gitter

KAPITEL 3. THEORIE DER MESSMETHODEN

Wechselwirkung dies verhindern würde. Die Übergangsrate wird durch die Relaxationszeit der Wechselwirkung bestimmt. Diese kann durch Zugabe von paramagnetischen Salzen zum Wasser beeinflusst werden. Atomkerne können dauernd Energie absorbieren, solange nur das hochfrequente Feld in der Spule die Resonanzfrequenz trifft.

Bedingt durch die Resonanz ändert sich leicht die Dämpfungskonstante der Spule. Diese Änderung läßt sich mit Hilfe, eines auf die Resonanzfrequenz des Atomkerns abgestimmten, Hochfrequenzschwingkreises und einer Überlagerung des Hauptfeldes mit einem schwachen Wechselfeld parallel zum Hauptfeld feststellen (Abbildung 3.2). Die Frequenz der Modulation liegt zwischen 30 und 70 Hz, die Amplitude beträgt einige 10^{-4} des zu messenden Feldes¹. Durch diese Modulation tritt bei einer festgehaltenen Frequenz ν

$$\nu = \frac{\omega_L}{2\pi}$$

sooft eine Resonanz auf, wie das magnetische Feld mit der entsprechenden Frequenz nach den obigen Beziehungen übereinstimmen. Dadurch wird die Dämpfungskonstante mit der Frequenz der Modulation des Feldes verändert. Dies hat eine Eigenfrequenzänderung des Schwingkreises zur Folge. Sie kann durch eine nachgeschaltete Elektronik ausgewertet werden [Metr 86].

Der Vorteil dieser Kernspinresonanz-Methode ist die physikalisch bedingte Linearität zwischen dem zu messendem Feld und der Frequenz. Die Genauigkeitsgrenze wird bestimmt durch die Genauigkeit der Kenntnis des gyromagnetischen Verhältnisses. Außerdem ist eine Temperaturabhängigkeit der Meßmethode nicht festgestellt worden.

Die Nachteile sind die geringe Empfindlichkeit bei Feldern unterhalb von 0,05 Tesla und die Empfindlichkeit gegenüber großen Inhomogenitäten. So darf der Feldgradienten nicht größer als $0,02 \frac{1}{\text{m}}$ des Feldes über dem Probevolumen sein, um die Resonanzlinie nicht zu sehr zu verbreitern. Die maximale zeitliche Änderung des Feldes ist bestimmt durch die Relaxationszeit. Sie kann nur auf Kosten der Auflösung verkürzt werden.

3.2 Feldmeßspule

3.2.1 Darstellung des Induktionsgesetzes

Mit einer Luftspule kann man Änderungen einer magnetischen Induktion entlang eines zurückgelegten Weges ebenso wie eine zeitliche Änderung einer Induktion an einem Ort messen.

¹Durch eine Auswerteelektronik wird der Zeitpunkt der Resonanz relativ zu einem Nulldurchgang der Modulation bestimmt, so daß auf das zu messende Feld zurückgerechnet werden kann.

KAPITEL 3. THEORIE DER MESSMETHODEN

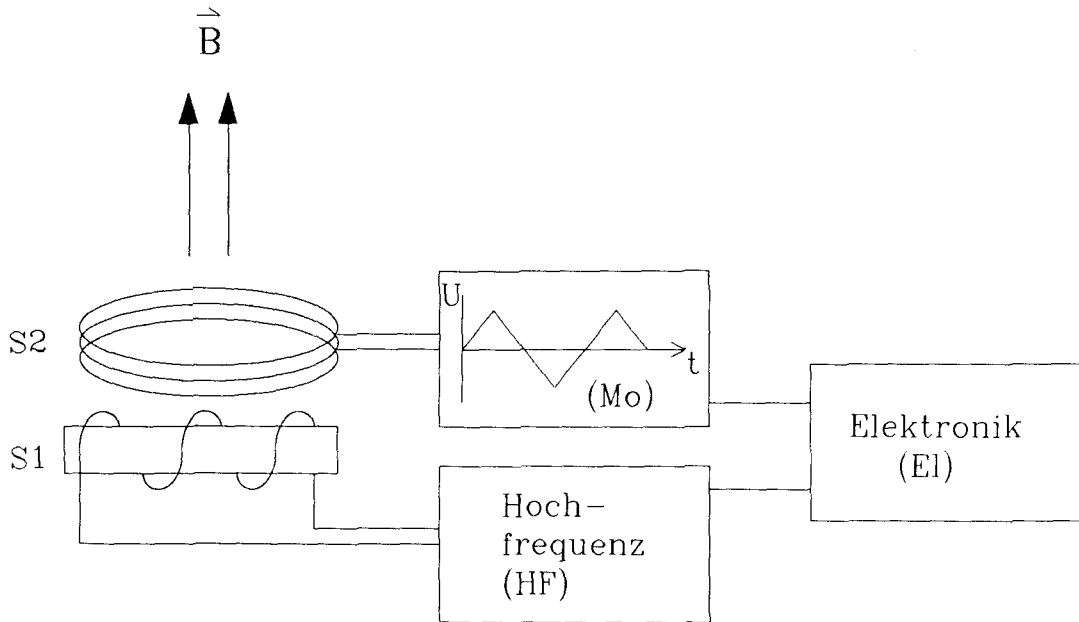


Abbildung 3.2: Blockschaltbild einer Kernspinresonanzsonde mit der Spule S1, die einen wassergefüllten Glaszylinder umgibt, im magnetischen Feld der Induktion $\vec{B}$, der Magnetfeldmodulationsspule S2, dem Resonanzfrequenzoszillator HF, dem Feldmodulationsgenerator MO und der Auswertelektronik EL

Die physikalische Beschreibung dieses Zusammenhanges basiert auf dem Faradayschen Induktionsgesetz

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Mit dem Stokesschen Satz umgeschrieben erhält man

$$U_{ind} = \oint_{\sigma} \vec{E} d\vec{s} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \vec{e}_n da$$

$\oint_{\sigma} \vec{E} d\vec{s}$ ist das Linienintegral über $\vec{E}$ entlang des festen Randes der Spule σ und beschreibt somit die induzierte Spannung U_{ind} (Abbildung 3.3). Hat die Spule N Windungen, so multipliziert sich die Spannung mit N .

$$\int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \vec{e}_n da$$

KAPITEL 3. THEORIE DER MESSMETHODEN

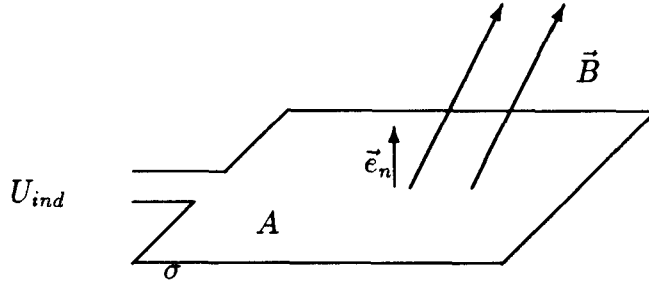


Abbildung 3.3: U_{ind} ist die induzierte Spannung an den Enden einer Leiterschleife in einem sich ändernden $\vec{B}$ -Feld; σ ist der Rand der Fläche A mit dem Flächeneinheitsvektor $\vec{e}_n$.

ist das Flächenintegral über die durch den Rand σ festgelegte Fläche A . $\vec{e}_n$ ist der Normaleneinheitsvektor der Fläche.

Mit diesem Zusammenhang zwischen dem Rand σ und der Fläche A kann die Zeitableitung vor das Flächenintegral gezogen werden. Nach einer Integration über die Zeit t erhält man

$$\int_{\tau} U dt = -N \int_A \vec{B} \vec{e}_n da$$

$\int_A \vec{B} \vec{e}_n da$ nennt man den magnetischen Fluß Φ .

$\int_{\tau} U dt$ ist die Meßgröße, die mit einem SpannungsinTEGRATOR gemessen werden kann. Ihre Einheit ist Weber bzw. Vs ($1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs}$). In der einfachsten Version kann der Integrator ein Operationsverstärker mit einem Kondensator im Rückkopplungszweig sein. Während der Integrationszeit ist er an der Spule angeschlossen (siehe Abbildung 3.4).

Wird die Spule vom Ort x_1, y_1 zum Ort x_2, y_2 gebracht, so wird die Flußdifferenz $\Delta\Phi_{trans}$ zwischen den beiden Orten gemessen.

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{trans} &= \Phi(x_1, y_1) - \Phi(x_2, y_2) \\ &= N \int_A \vec{B}(x_1, y_1) \vec{e}_n da - N \int_A \vec{B}(x_2, y_2) \vec{e}_n da \end{aligned}$$

KAPITEL 3. THEORIE DER MESSMETHODEN

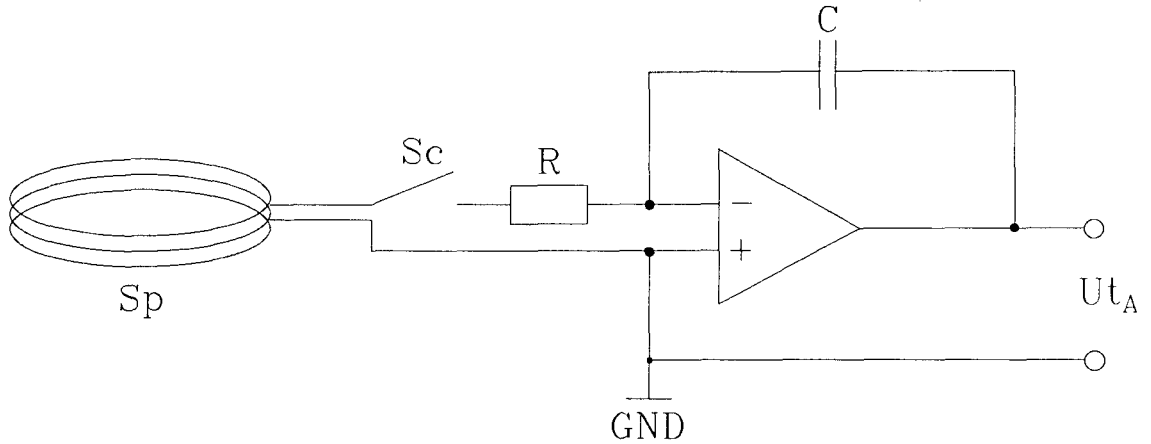


Abbildung 3.4: Einfacher Spannungsintegrator bestehend aus: Operationsverstärker Op, Kondensator C, Eingangswiderstand R, Schalter Sc und Spule Sp. A ist der Ausgang mit der gemessenen Spannungszeitfläche $U t_A$.

$$= \int_{\tau(x_1, y_1)}^{\tau(x_2, y_2)} U dt$$

Wird die Spule am selben Ort um 180° gedreht, das heißt die Orientierung umgedreht, so wird die Flußdifferenz $\Delta\Phi_{rot}$ gemessen.

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{rot} &= \Phi(\vec{e}_n) - \Phi(-\vec{e}_n) \\ &= N \int_A \vec{B} \vec{e}_n da - N \int_A \vec{B} (-\vec{e}_n) da \\ &= 2N \int_A \vec{B} \vec{e}_n da = \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt \end{aligned}$$

Bei einer Änderung des Stromes von I_1 nach I_2 gilt für den Fluß $\Delta\Phi_{\Delta I}$

KAPITEL 3. THEORIE DER MESSMETHODEN

$$\begin{aligned}
 \Delta\Phi_{\Delta I} &= \Phi(I_1) - \Phi(I_2) \\
 &= N \int_A \vec{B}(I_1) \vec{e}_n da - N \int_A \vec{B}(I_2) \vec{e}_n da \\
 &= \int_{\tau(I_1)}^{\tau(I_2)} U dt
 \end{aligned}$$

3.2.2 Gesamter Feldbereich

Ist die magnetische Induktion über die Breite b der Spule konstant, so kann man

$$\Delta\Phi = N \int_A \vec{B} \vec{e}_n da$$

weiter umformen in

$$\Delta\Phi = N b \int_{\lambda} \vec{B} d\vec{l}.$$

Dabei ist λ die Spulenlänge. Laut der Beschreibung der effektiven Länge l_{eff} auf der Seite 8 ersetzt man

$$\int_{\lambda} \vec{B} d\vec{l}$$

durch

$$B_0 l_{eff}$$

und erhält

$$\Phi = \int_{\tau} U dt = N b B_0 l_{eff}.$$

Bei bekanntem B_0 kann man mit einer Spule, die durch den gesamten Feldbereich geht, die effektive Länge direkt messen

$$l_{eff} = \frac{1}{N b B_0} \int_{\tau} U dt.$$

3.2.3 Homogener Feldbereich

Befindet sich eine Spule ganz in einem homogenen Feld², hat also das Feld hat einen bestimmten, ortsunabhängigen Wert über den ganzen betrachteten Bereich, so gilt

$$\int_A \vec{B} \vec{e}_n da = B_{konst} \int_A da = B_{konst} A.$$

²Wenn nicht ausdrücklich anders erwähnt, ist in dieser Arbeit mit dem homogenen Teil der Magnete der innere Feldbereich gemeint, der maximal um einige 10^{-3} des Feldwertes schwankt.

KAPITEL 3. THEORIE DER MESSMETHODEN

Damit kann man die magnetische Induktion durch eine Drehung der Spule um 180° messen. Dies nennt man Spulenflip. Es gilt dann

$$B = \frac{1}{2NA} \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt.$$

Für die Verschiebung der Spule vom Ort (x_1, y_1) zum Ort (x_2, y_2) erhält man für die magnetische Induktion

$$\Delta B(\Delta x, \Delta y) = B(x_1, y_1) - B(x_2, y_2) = \frac{1}{NA} \int_{\tau(x_1, y_1)}^{\tau(x_2, y_2)} U dt$$

$$\text{mit } \Delta x = x_2 - x_1; \quad \Delta y = y_2 - y_1.$$

Bei einer Änderung des Stromes gilt

$$\Delta B(\Delta I) = B(I_1) - B(I_2) = \frac{1}{NA} \int_{\tau(I_1)}^{\tau(I_2)} U dt$$

$$\text{mit } \Delta I = I_2 - I_1.$$

3.3 Hallsonde

Die Hallsonde ist ein stromdurchflossener Leiter oder Halbleiter. In einem nicht zum Strom parallelen Magnetfeld tritt die Lorentzkraft auf. Stehen Magnetfeld und Strom senkrecht aufeinander, bewirkt sie eine Ablenkung der Ladungsträger senkrecht zum Feld und zum Strom (Abbildung 3.5). Im Gleichgewicht kompensiert das aus der Ladungsverschiebung resultierende elektrische Feld die Lorentzkraft. Die durch die Ladungsverschiebung erzeugte Spannung ist in erster Näherung proportional zur magnetischen Induktion.

Für einen quaderförmigen Leiter der Dicke d gilt näherungsweise

$$U_H = R_H \frac{IB}{d}$$

Die Spannung U_H liegt bei gebräuchlichen Sonden bei einigen 100 mV für Felder mit einigen zehntel Tesla. Die Hallkonstante R_H ist ein zusammengefaßter Faktor aus Teilchendichte und Beweglichkeit der Ladungsträger. Sie ist temperaturabhängig. Die Temperatur der Probe wird nicht nur

KAPITEL 3. THEORIE DER MESSMETHODEN

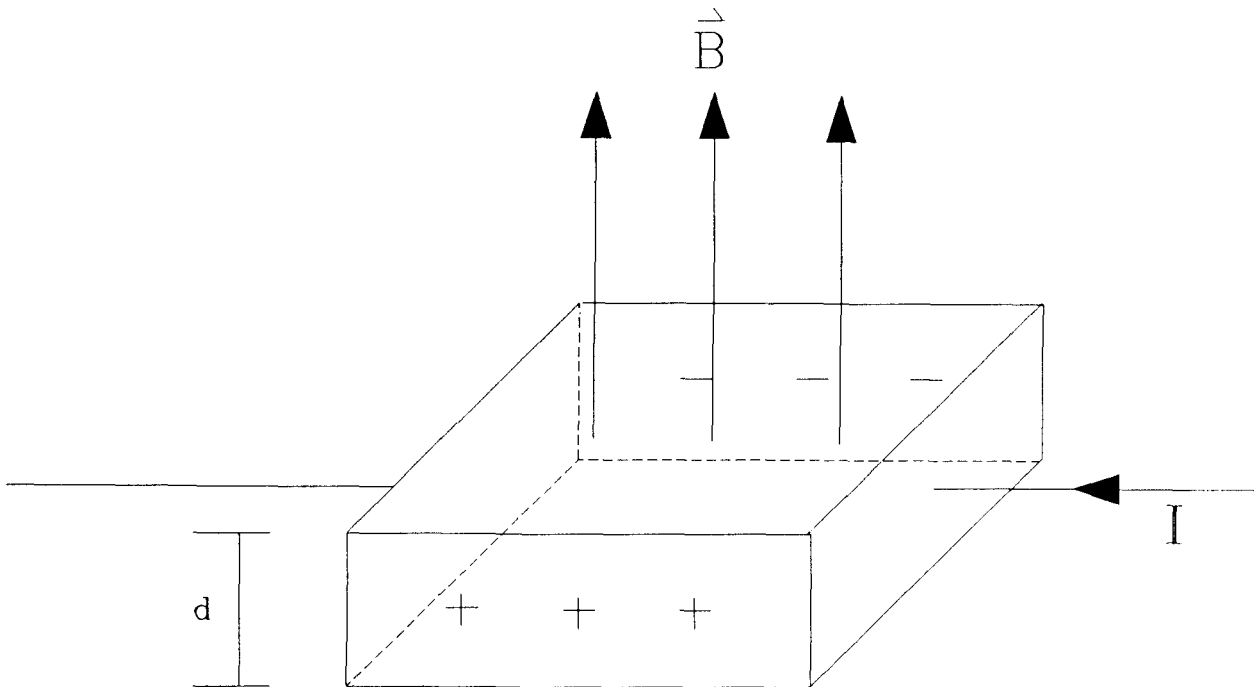


Abbildung 3.5: Die Hallsonde ist einen Quader der Dicke d , durch den ein Strom I fließt. Senkrecht dazu steht die magnetische Induktion B . Zu beiden Größen senkrecht bildet sich eine Ladungsverschiebung aus, angedeutet durch + und -.

durch die Umgebungstemperatur bestimmt, sondern auch durch die Wärmebildung, die aus ohmschen Verlusten in der Hallsonde resultieren. Außerdem werden durch große Änderungen des zu messenden Feldes Wirbelströme in der Sonde induziert, die ebenfalls Wärme erzeugen. Der Hauptvorteil der Hallsonden liegt darin, daß sie extrem klein hergestellt werden können ($d \leq 0,1\text{mm}$). Dadurch wird in inhomogenen Feldern eine hohe Ortsauflösung erreicht.

Kapitel 4

Meßverfahren

Die Bestimmung der Ablenkstärke, der effektiven Länge, der relativen Feldverteilung, des absoluten Feldwertes und der Multipolkoeffizienten für eine Stromeinstellung ist mit einer Meßreihe, der Aufnahme der **Feldkarte**, mit Hilfe von Spulen möglich. Dazu sind vier Spulen vorhanden, die alle auf einer Parallelen zur z -Achse liegen. Zwei von ihnen befinden sich im homogenen, inneren Teil, zwei in den Streufeldbereichen, in den äußeren Teilen des Magneten. Eine genauere Beschreibung der Spulenanordnung befindet sich in den Kapiteln 4.4 und 5.1 auf den Seiten 28 und 30.

Für die Bestimmung der **Magnetisierungskurve** wird eine andere Meßreihe benötigt. Dafür können dieselben Spulen benutzt werden.

Die so ermittelten Daten für jeden Magneten sind die Grundlage für die Anpassung aller zu messenden COSY-Magnete an den ersten.

4.1 Magnetisierungskurve

Nach einer vom Benutzer vorgegebenen Stromfolge wird ein frei wählbarer Anfangsstrom eingestellt. Die magnetische Induktion wird durch einen Spulenflip laut

$$B = \frac{1}{2NA} \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt$$

gemessen. (Für den Strom $I = 0$ wird das Remanenzfeld bestimmt.)

Bei ruhender Spule wird der Strom in einzelnen Stufen verstellt. Während einer neuen Stromeinstellung wird die induzierte Spannung integriert. Nach

$$\Delta B(\Delta I) = \frac{1}{NA} \int_{\tau(I_1)}^{\tau(I_2)} U dt; \quad \Delta I = I_2 - I_1$$

KAPITEL 4. MESSVERFAHREN

wird jeweils die Änderung der magnetischen Induktion gemessen. Die aufsummierten Werte und der Wert des Spulenflips ergeben die absoluten Feldwerte bei den entsprechenden Strömen.

Zur Kontrolle der Meßwerte wird das SpannungsinTEGRAL während des Zurücksetzens des Stromes auf den Anfangswert mit aufgenommen. Anschließend wird bei diesem Strom nochmals ein Spulenflip vorgenommen. Da bei einer geschlossenen Stromkurve das Gesamtintegral null sein sollte, lassen Abweichungen davon Fehlererkennungen, bedingt durch Hystereseeffekte oder Integrationsprobleme, zu.

Für die Messung der Magnetisierungskurve wird eine Spule bekannter Fläche im homogenen Feldbereich benötigt.

Bei dieser Messung wird zusätzlich das Spannungszeitintegral aus der Korrekturspule um das Rückjoch des Magneten mitprotokolliert.

4.2 Feldkarte

Die Feldkarte wird bei einem konstanten Strom aufgenommen. Die magnetische Induktion mißt man am Koordinatenursprung der Ebene $z = 0$ durch einen Spulenflip laut

$$B_0 = B(0, 0) = \frac{1}{2NA} \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt$$

Oberhalb, in und unterhalb der Mittelebene wird die Meßspule in gleichen Abständen bezüglich der x -Achse positioniert. Dadurch ist ein Raster festgelegt. Die Integratoren werden vor dem Verfahren der Spulen von einem Rasterpunkt zum nächsten gestartet und nach Erreichen des nächsten gestoppt. So wird die wegen örtlich verschiedener Felder induzierte Spannung integriert. Alle

$$\Delta B(\Delta x, \Delta y) = B(x_1, y_1) - B(x_2, y_2) = \frac{1}{NA} \int_{\tau(x_1, y_1)}^{\tau(x_2, y_2)} U dt$$

bis zum betrachteten Ort, entlang des zurückgelegten Weges, und der Wert des Spulenflips werden aufsummiert. Die jeweilige Summe ist der absolute Feldwert an diesem Ort. Dafür werden Spulen mit bekannter Fläche, die ganz im inneren annähernd homogenen Bereich liegen, benötigt.

Mit Spulen bekannter Breite b , die über die gesamte Länge des Feldes hinausgehen, wird gleichzeitig die effektive Länge und die Ablenkstärke nach

$$l_{eff} = \frac{1}{NbB_0} \int_{\tau} U dt$$

KAPITEL 4. MESSVERFAHREN

und

$$B_0 l_{eff} = \int_{\lambda} B \, dl$$

für jeden Rasterpunkt gemessen.

Durch eine spiegelsymmetrische Aufteilung der Spulen bezüglich der Ebene $z = 0$ erhält man eine Aussage über die Abweichungen der effektiven Längen auf beiden Seiten der Ebene. Dazu muß die Spule auf die mechanische Ebene $z = 0$ einjustiert sein.

Zur Kontrolle wird am Ende der Messung beim Zurückfahren an die Ausgangsposition und bei einem erneuten Spulenflip das Spannungszeitintegral gemessen. Abweichungen der Summe über alle Integrale von Null zeigen Fehler an.

Die relative Feldverteilung $\frac{\Delta B}{B}$ und die Multipolkoeffizienten c_n werden aus den Meßwerten berechnet. Eine genaue Beschreibung der Berechnungen befindet sich im Kapitel 6.6 auf Seite 63 zur Datenauswertung.

Die Anpassung aller Ablenkmagnete an den ersten wird durch Anbringen von Polschuhkorrekturplatten (Shims) an den Stirnseiten der Magnete erreicht. In erster Näherung ist die Änderung der effektiven Längen des Magneten gleich der Dicke der Korrekturplatten, solange die Korrekturen klein (einige mm gegenüber einer effektiven Länge von ca. 1833mm) sind. Die Grundlagen für die Anpassung sind jedoch die gemessenen Ablenkstärken, die mit B_0 proportional zu den effektiven Längen sind.

4.3 Spulenflip

Für einen Spulenflip werden die Integratoren, nachdem ein fester Stromwert eingestellt ist, gestartet. Die Meßspulen werden aus dem Magneten herausgefahren, dann im fast feldfreien Raum von Hand um 180° gedreht. Sie werden nun mit entgegengesetzter Orientierung wieder an die Ausgangsposition zurückgefahren. Dort angekommen, stoppt die Integration.

Die Spulen werden aus folgendem Grund in den nahezu feldfreien Raum gefahren. Bei einer Eingangsspannung von über 0,2 V schaltet der Integrator in den nächst höheren Meßbereich um. Dies ist mit einem Verlust an Genauigkeit verbunden. Bei einer Drehung der Spule von Hand innerhalb größerer Felder bis zu 1,6 T ist es nur schwer möglich, die Spule so langsam zu drehen, daß keine Spannung über 0,2 V induziert wird. Dagegen ist es mit den Zweiachstischen einfach die Maximalgeschwindigkeit so einzustellen, daß die induzierte Spannung beim Fahren entlang der x -Achse durch den Randfeldbereich hindurch nicht die Spannungsgrenze überschreitet. Außerhalb des Magneten ist die Integration unempfindlich gegenüber nicht gleichmäßig schnellen Drehungen. Die maximal zu erreichende Induktionsspannung liegt dort deutlich unterhalb der zulässigen Grenze.

KAPITEL 4. MESSVERFAHREN

4.4 Spulenanordnung

Für die verschiedenen zu bestimmenden Größen werden zum einen Spulen gebraucht, die ganz im Innern des nahezu homogenen Feldbereichs liegen und zum anderen Spulen, die die gesamte Länge des Feldbereiches abdecken. Mit einer Unterteilung in einzelne Spulen entlang der z -Achse sind beide Forderungen zu erfüllen. Zwei einzelne Spulen werden für die Erfassung des Streufeldbereiches für positive und negative z -Koordinatenwerte benötigt. Sinnvoll ist eine spiegelsymmetrische Anordnung zur Mitte. Die Länge dieser Streufeldspulen in z -Richtung wird so groß gewählt, daß das Randfeld am äußeren Ende der Spule mindestens um den Faktor 0,01 kleiner ist, als die Auflösung der Meßapparatur. Die magnetische Induktion eines Dipolfeldes fällt mit der dritten Potenz der Entfernung von der Eisenkante aus in z -Richtung ab ($B \propto \frac{1}{z^3}$). Andere vorhandene höhere Multipolanteile fallen noch schneller ab.

Für die Absolutfeldbestimmung ist mindestens eine Spule im inneren homogenen Feldbereich nötig. Für einen Vergleich der effektiven Längen auf den beiden Seiten (positive und negative z -Achse) des Magneten wird dieser Feldbereich jedoch mit zwei Spulen, die ebenfalls spiegelsymmetrisch zur Mitte liegen, ausgemessen. Durch diese Aufteilung können die Flächen der beiden Spulen getrennt kalibriert werden. Eventuelle Abweichungen der Flächen der beiden inneren Spulen können festgestellt und als Korrektur berücksichtigt werden. Die gesamte effektive Länge und die Ablenkstärke wird mit allen vier Spulen bestimmt.

Eine solche Spulenanordnung wird als Spulensatz bezeichnet. Er ist nicht der Teilchenbahn entsprechend im Kreisbogen, sondern gerade gefertigt. Sonst ist es nach einem Spulenflip nicht möglich, den Spulensatz mit entgegengesetzter Flächenorientierung wieder am selben Ort zu positionieren; die Krümmung hätte eine andere Richtung.

Die für Strahlspurrechnungen wichtigen Unterschiede zwischen dem gemessenen Feld entlang der Geraden und dem der tatsächlichen Kreisbahn der Teilchen können berechnet werden. Dazu muß das Streufeld an einigen Punkten mit einer Hallsonde ausgemessen werden. Aus diesem Randfeldprofil kann man Korrekturen für Strahlspurrechnungen zu den mit den geraden Spulen gemessenen Werten berechnen [Mart 89, Wind 70].

Die Breite der Spulen ist ein Kompromiß aus der Empfindlichkeit der Spulen und der Ortsauflösung. Dadurch wird die Meßgenauigkeit in einem Feld großer Änderung begrenzt. Hinzu kommen Fertigungsschwierigkeiten bei geringen Abständen. Bei einem großen Feldgradienten von zum Beispiel $1 \frac{\text{T}}{\text{m}}$ und einer Breite der Spule von 5 mm ändert sich das Feld auf dieser Breite um 5×10^{-3} T. Dies ist die maximal erreichbare Auflösung. Bei kleineren Feldgradienten ist die Auflösung mit der selben Spulenbreite größer, aber die induzierte Spannung beim Verschieben der Spulen geringer. Wählt

KAPITEL 4. MESSVERFAHREN

man schmalere Spulenbreiten, hat man auf eine Begrenzung der minimalen Eingangsspannung der Integratoren bei kleinen Feldänderungen zu achten. Um eine hohe Ortsauflösung und trotzdem eine ausreichende Empfindlichkeit zu erreichen, werden die Spulen aus vielen Windungen aufgebaut. Die Auslegungsdaten sind in der Tabelle 10.2 auf Seite 110 zusammengefaßt¹.

¹Die Auslegung wurde von Dr. Ulf Bechstedt, KFA Jülich, berechnet

Kapitel 5

Meßaufbau für die Feldmessungen an Ablenkmagneten

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Komponenten des Meßaufbaus der Dipolfeldmeßapparatur vorgestellt.

Die Meßanordnung besteht aus zwei, mit Schrittmotoren versehenen Zwei-Achsen-Tischen mit einer Rechnersteuerung (auch Computerized Numerical Control genannt, kurz CNC), die einen Spulenträger mit mehreren Spulen durch den Polspalt der Magnete fahren. Für die Messung von Spannungen, Spannungszeitintegralen, Strömen und Temperaturen stehen sieben Systemvoltmeter zur Verfügung. Für direkte Feldmessungen am Magneten existieren eine Hallsonde mit einer Konstantstromquelle und eine Kernspinresonanzsonde. Die Datenaufnahme, die Steuerung aller Meßgeräte sowie die Tischsteuerung wird mit Hilfe eines Computers unter dem Betriebssystem UNIX vorgenommen. Die Schnittstelle zur Steuerung der Stromversorgung des Magneten ist vorbereitet.

Die Abbildung 5.1 zeigt den prinzipielle Aufbau des gesamten Meßaufbaus.

5.1 Überblick über die Spulengeometrie

In einem quaderförmigen Spulenträger sind die Meßspulen in gefräste Vertiefungen eingebettet. Jede Spule besteht aus 100 einzelnen Windungen. Mehrere Spulen entlang der gesamten Spulenträgerlänge bilden zusammen einen Spulensatz. Auf dem Träger befinden sich auf der Ober- und Unterseite jeweils zwei Spulensätze.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

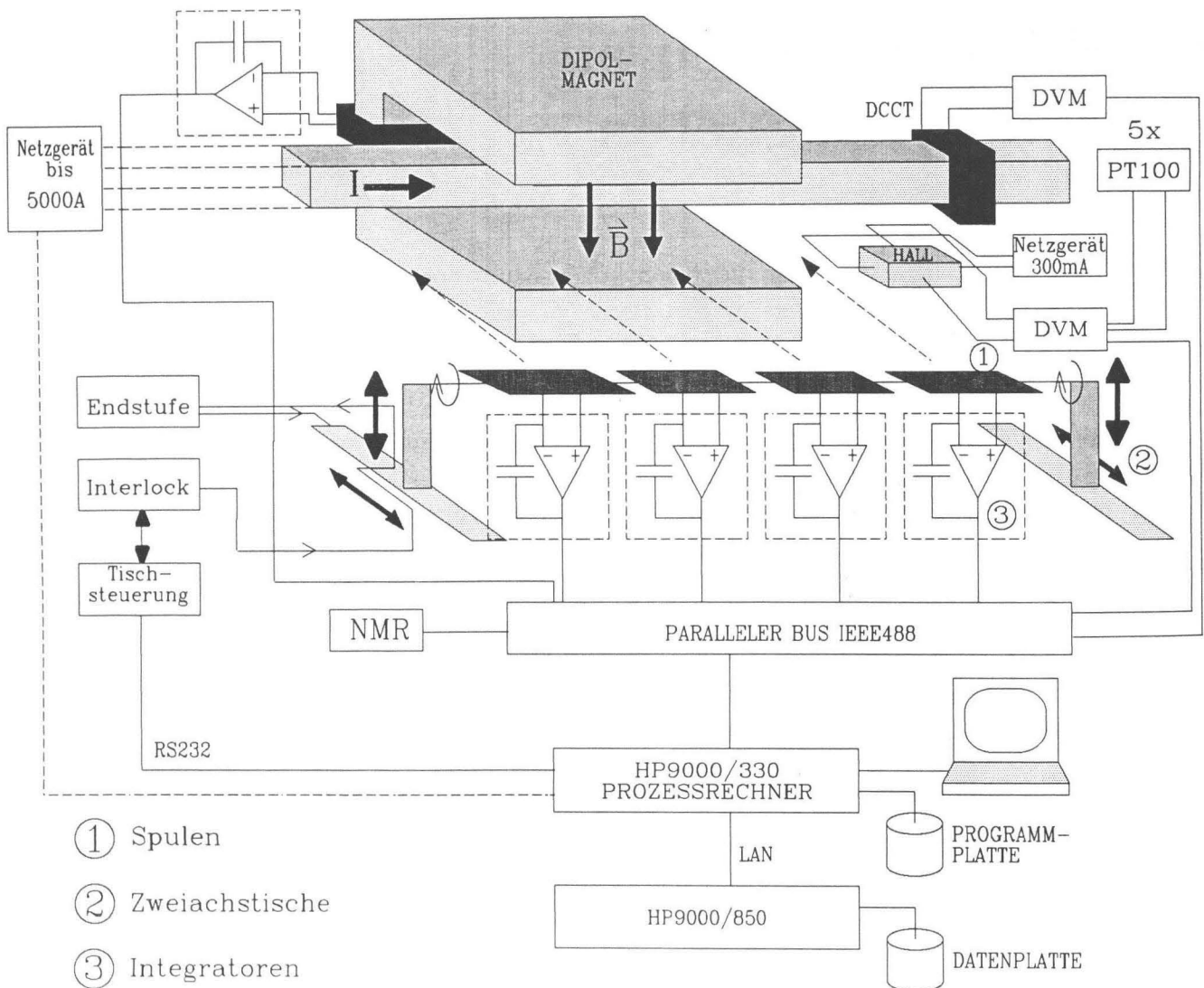


Abbildung 5.1: Blockschaltbild des Meßaufbaus. Die Wirkungsweise der einzelnen Elemente ist im Text erklärt. Die Systemvoltmeter sind je nach ihrer Aufgabe entweder als Digitalvoltmeter (DVM) oder als Integratoren gezeichnet.

5.1.1 Spulenträger

Der Spulenträger hat einen rechteckigen Querschnitt. Die Fertigungsmaße sind in der Tabelle 10.2 aufgeführt.

Er besteht auf der Ober-, Unterseite und den beiden Längsseiten aus

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Aus Festigkeitsgründen verlaufen die Kohlenstoffasern in Längsrichtung. Das Innere des Trägers ist mit einem leichten Hartschaum ganz ausgefüllt. Durch diese Bauweise bleibt der Träger leicht, (2,5 kg) und seine Durchbiegung ist gering. Bei einer beidseitigen Unterstüztung im Abstand von 2 m beträgt die Durchbiegung $\frac{5}{10}$ mm. In Längsrichtung sind auf der Ober- und Unterseite je vier Nuten gefräst. Der Abstand der Mitte der inneren Nuten von den äußeren ist $5 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$. Die hohe Genauigkeit wird durch eine speziell gefertigten Fräser erreicht. Er besteht aus vier einzelnen, auf die Nutbreite geschliffenen Scheibenfräsen und Abstandsringen zwischen den Scheiben. Sie sind zusammen auf einer Welle fest verschraubt (Abbildung 5.2). Diese Fertigungsmaße sind mit mechanischen Meßuhren überprüft worden. Der Abstand der Nuten wurde mit einer Mikrometerschraube kontrolliert.

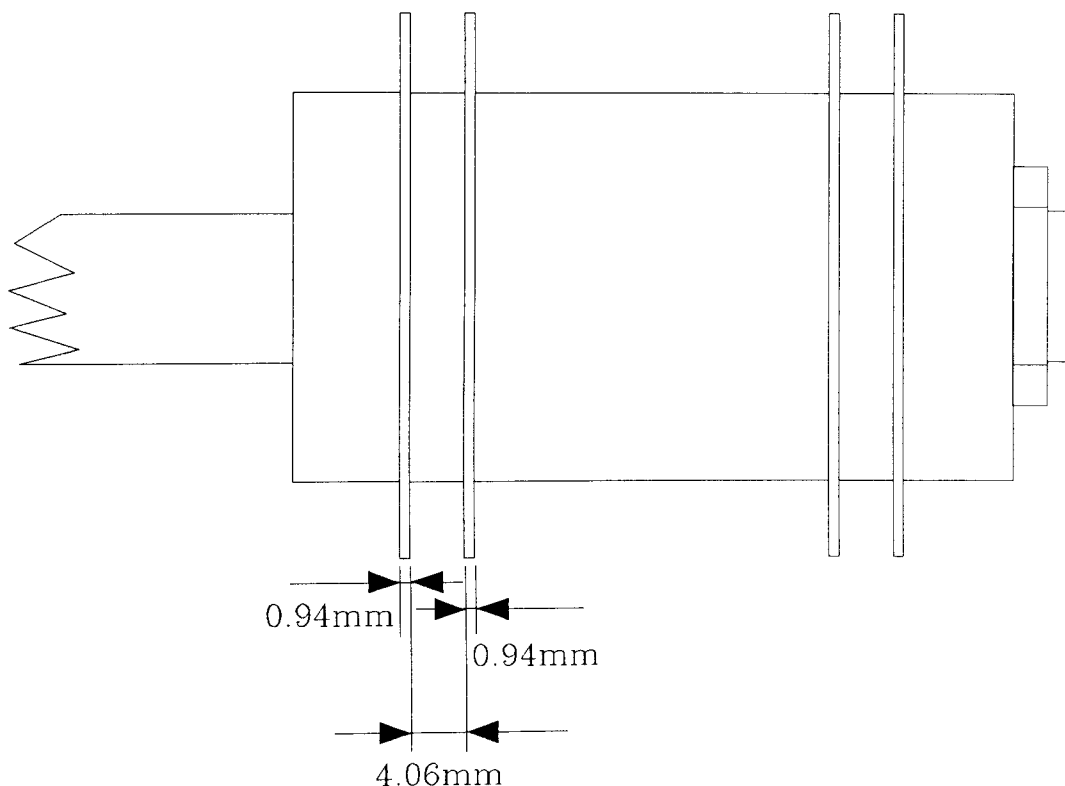


Abbildung 5.2: Vier einzelne Scheibenfräser (Breite = 0,94 mm) sind auf einer Welle zusammen mit Abstandsringen festgeschraubt. Dadurch ist eine hohe Genauigkeit im Nutabstand erreichbar.

Die jeweils beiden äußeren Nuten bilden zusammen eine Einbettung eines Spulensatzes.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

Nuttiefe und Nutbreite sind so gewählt, daß eine 100-adrige, verdrehte Hochfrequenzlitze mit einem Durchmesser von 1,04 mm beim Eindringen in die Nut einen fast quadratischen Querschnitt bekommt. Dadurch ist die Lage und der Schwerpunkt wohldefiniert.

Die Lage der Litze in einer solchen Nut wurde in Vorversuchen mit Schliffbildern kontrolliert (Abbildung 5.3).

Eingedrückt wird die Litze mit einer Rolle, die in der Mitte einen Steg in der Dicke der Nutbreite hat. Die Höhe des Steges entspricht der Differenz zwischen der Nutbreite und Nuttiefe.

Für eine genaue optische Lagebestimmung des Spulenträgers auf der Meßapparatur sind je drei Paßbüchsen aus Macor auf der Ober- und Unterseite in die Mitte zwischen den inneren Nuten eingelassen. In diese Büchsen werden bei der Ausrichtung der Spule zum Magneten Meßspitzen eingesetzt. Macor ist eine nichtleitende nichtmagnetische Glaskeramik, die einfach und präzise bearbeitet werden kann. Da die Meßspitzen bei jedem Ausrichten des Spulenträgers in die Büchsen eingesetzt werden müssen, ist es wichtig, daß Macor verschleißfest ist.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

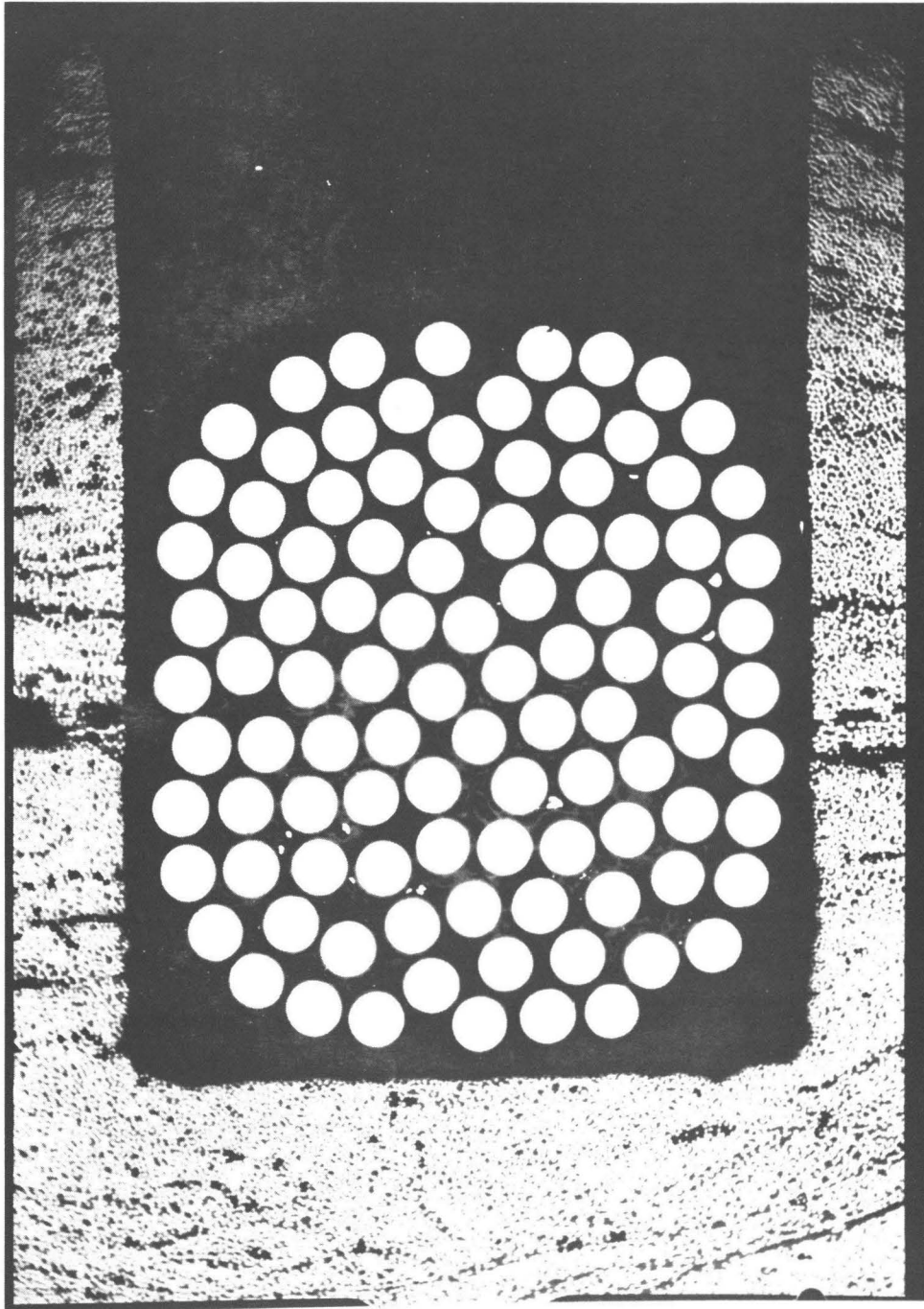


Abbildung 5.3: Schliffbild ist senkrecht zu den Drähten der Spule. Die hellen Kreise zeigen die Einzeldrähte, der dunkle Kasten mit den kleinen hellen Punkten den CFK.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

5.1.2 Spulensatz

Insgesamt besitzt ein Spulenträger vier Spulensätze. Zwei der Spulensätze sind, wie im Kapitel 4.4 auf Seite 28 beschrieben, in vier Spulen unterteilt. Die Enden der Spulen sind als Halbkreise gefräst, damit beim Eindrücken der HF-Litze in die Nuten keine scharfen Kanten die Litze beschädigen können (Abbildung 5.4). Die fehlende Fläche an den Übergängen von einer

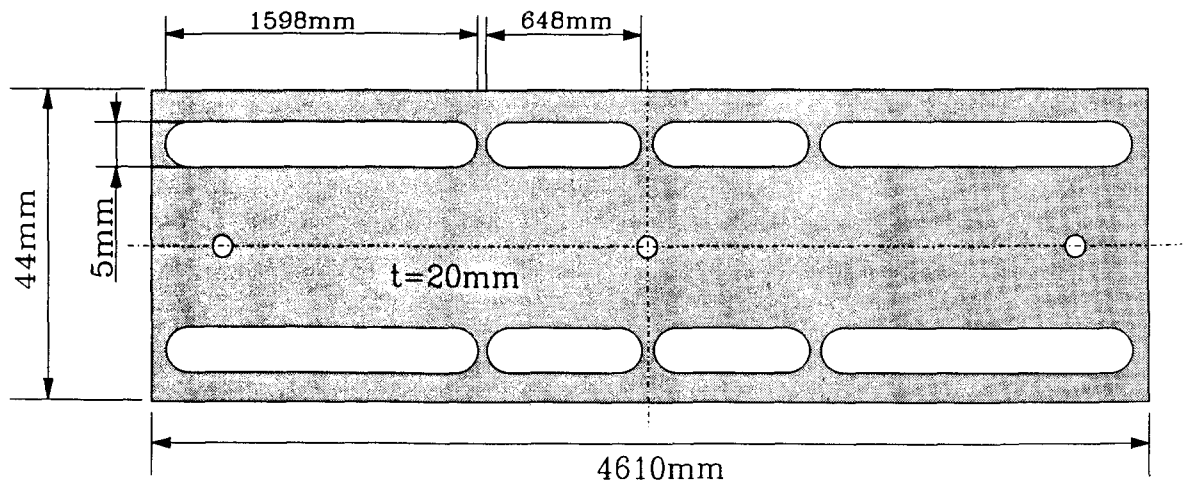


Abbildung 5.4: Auf einem Spulenträger befinden sich vier Spulensätze. Hier ist eine Seite dargestellt, auf der sich zwei Sätze mit je vier Spulen befinden.

Spule zur anderen wird rechnerisch kompensiert. Für sie gilt

$$A_{Fehl} = b d - \frac{\pi b^2}{4}$$

wobei b die Breite der Spule ist und d der Abstand zwischen den beiden Halbkreismittelpunkten (Abbildung 5.5).

Um die Unsicherheit bei der Bestimmung der Fehlflächen auszuschließen, ist auf dem Spulenträger einer der Spulensätze nur einmal in der Mitte (Ebene $z = 0$) unterteilt. Bei bekanntem Magnetfeld B_0 läßt sich die effektive Länge auf beiden Seiten des Magneten getrennt vermessen.

Ein weiterer Spulensatz geht über die gesamte Länge des Trägers. Mit ihm läßt sich das gesamte Feldintegral $\int B dl$ ohne Berücksichtigung von Fehlflächen messen.

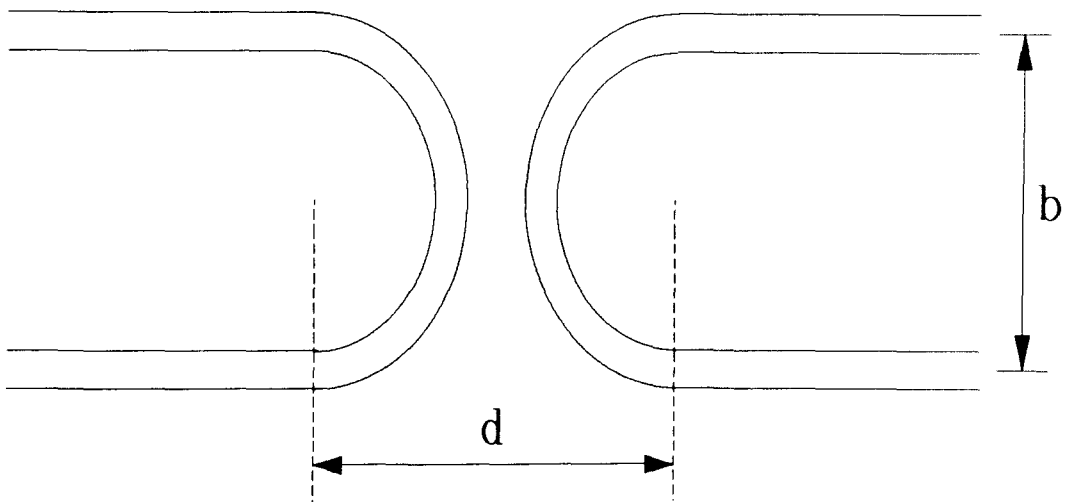
KAPITEL 5. MESSAUFBAU

Abbildung 5.5: Fehlfläche zwischen zwei Spulen; sie wird bestimmt aus der Spulenbreite b und den Abstand der beiden Halbkreismitelpunkte d .

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

5.1.3 Spulen

Die Spulen bestehen aus 100-adriger, verdrehter HF-Litze. Ihre Drähte sind zur Isolierung gegeneinander einzeln lackiert und insgesamt zum mechanischen Schutz mit Seide umspunnen. Die einzelnen Drähte dieser Litze werden in Reihe verlötet, so daß sie zusammen 100 Windungen ergeben.

Die Platinen, auf denen die Lötstellen angebracht sind, befinden sich an den Längsseiten des Spulenträgers. Die durchs Löten entstehenden zusätzlichen Flächen haben eine Orientierung, die senkrecht zum Normalenvektor $\vec{e}_n$ der hauptsächlichen Spulenfläche stehen, und damit keinen Beitrag zur Messung liefern können. Die Kabel zwischen Spule und Steckverbindung an den Kopfseiten des Spulenträgers sind eng verdreht, so daß sie nur einen geringen Beitrag zu Spulenfläche leisten. Eine Abschätzung der Größe dieser Fläche befindet sich im Kapitel 7.3.1 zur Fehlerbetrachtung auf der Seite 80.

5.1.4 Spulenkibration

Für die Bestimmung der effektiven Länge und der integralen Feldlänge muß die Anzahl der Windungen und die Spulenbreite bekannt sein. Beides kennt man aus der Fertigung des Spulenträgers und der Spulen.

Nur die Bestimmung des absoluten Feldes fordert eine genaue Kenntnis der Spulenfläche. Daher genügt es, die Fläche der beiden Spulen im Inneren eines Spulensatzes zu kalibrieren. Dazu bedient man sich eines bekannten homogenen Magnetfeldes. Dieses Feld muß dabei länger sein als die zu kalibrierende Spule. Die Kalibrationsfelder $B(I_1)$ und $B(I_2)$ werden bei den konstanten Strömen I_1 und I_2 in einem engmaschigen Ortsraster mit einer Kernspinresonanzsonde vermessen. Dabei sind Auflösungen des Feldes von einigen 10^{-6} des Feldwertes möglich [Näge 88].

Ist ein solches Raster aufgenommen worden, so kann das Feld durch Messung an einer markierten Stelle bestimmt werden. Dieser Meßwert, multipliziert mit einem die Feldverteilung berücksichtigenden Korrekturfaktor, ergibt das gemittelte Feld $\bar{B}(I)$ über die Spulenfläche. Nach der Messung des Feldes $B(I_1)$ an der markierten Stelle wird das Spannungszeitintegral bis zum Erreichen des Feldes $B(I_2)$ bestimmt. Das Feld $B(I_1)$ wird ebenso wie $B(I_2)$ gemessen, da eine eindeutige Bestimmung des Feldes aus dem gemessenen Strom wegen des Hystereeffektes nicht immer möglich ist. Die Spulenfläche berechnet man nach

$$A_{Spule} = \frac{1}{2N} \frac{\int_{\tau(I_2)}^{\tau(I_1)} U dt}{\bar{B}(I_2) - \bar{B}(I_1)}$$

Dabei sind $\bar{B}(I_2)$ und $\bar{B}(I_1)$ die Mittelwerte der magnetischen Induktionen

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

über die Spulenfläche beim Strom I_2 und I_1 .

Mit dieser Methode können Flächen auf 10^{-4} relativ zueinander bestimmt werden.

Für die Kalibrationsmessungen wurde ein Dipolmagnet mit einem auf 2 m Länge genau vermessenem Feld des Europäischen Kernforschungszentrums (CERN) benutzt.

5.1.5 Bezeichnung der Spulen

In der beschriebenen Geometrie wurden die Spulenträger A und B gefertigt und kalibriert.

Die jeweils vier Spulensätze der Träger werden mit a bis d bezeichnet. Die Spulen in jedem Satz werden, beginnend mit 0, von einer Seite aus durchnummeriert.

5.1.6 Spulenträgerkoordinaten

Für jeden Spulensatz wird eine Schwerlinie bestimmt. Sie verläuft in der Mitte zwischen den beiden zu einem Spulensatz gehörenden Nuten. Ihre Lage wird in einem zweidimensionalen, rechtwinkligen Koordinatensystem beschrieben, dessen Ursprung in der Mitte (Schnittpunkt der Diagonalen) des Querschnitts des Spulenträgers liegt. Dieses Koordinatensystem ist nach der Einjustierung des Spulenträgers in den Magneten um einen Vektor zur x, y -Ebene des Magneten verschoben. Schaut man auf die Stirnseite, bei der die Spule 0 der jeweiligen Spulensätze beginnt, so sind die Vorzeichen und die Lage der Spulensätze festgelegt durch die in der Abbildung 5.6 angegebenen Bezeichnungen. Diese unübliche Festlegung der Vorzeichen in dem Koordinatensystem ist bestimmt durch die herstellerbedingte Vorzeichenwahl der Koordinaten der Tischsteuerung.

5.1.7 Orientierung des Spulenträgers

Es gibt vier verschiedene Möglichkeiten den Spulenträger in den Magneten zu legen. Um die Orientierung des Trägerkoordinatensystems zu bestimmen, ist für jede mögliche Lage eine Farbmarke oben auf dem Träger auf einer gekennzeichneten Seite des Magneten angebracht (Abbildung 5.6).

Bei einer Drehung des Spulenträgers ändert sich das relative Vorzeichen der Spulensätze zum Magnetkoordinatensystem. Eine Drehung um die Längsachse, wie zum Beispiel bei einem Spulenflip, bewirkt eine Koordinatentransformation $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, bei einer Drehung um die Querachse ergibt sich $x \rightarrow x$, $y \rightarrow -y$, und aus einer Drehung um die Hochachse folgt $x \rightarrow -x$, $y \rightarrow y$.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

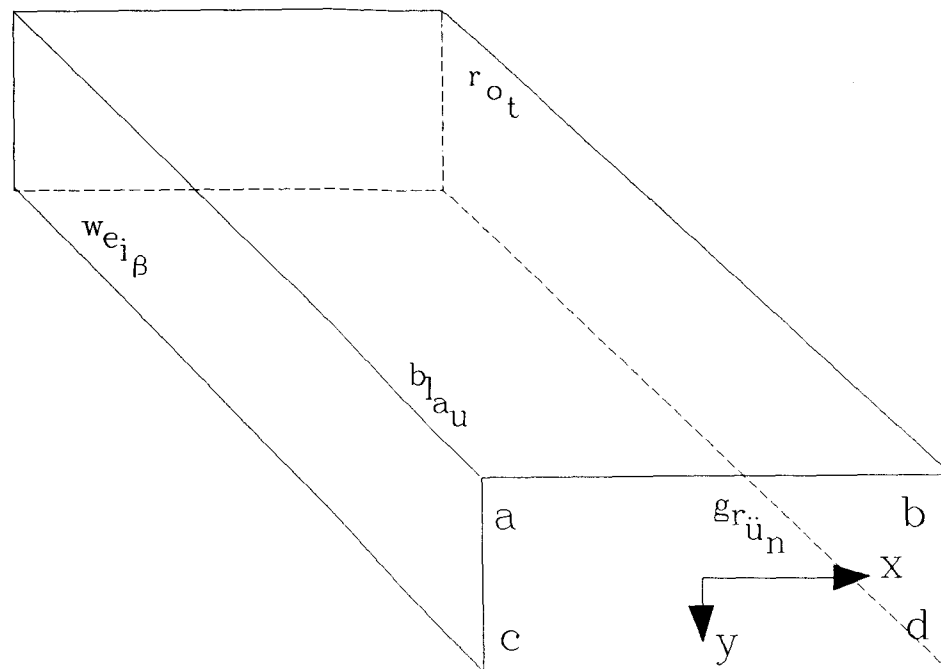


Abbildung 5.6: Spulenträger mit Festlegung des Koordinatensystems, Bezeichnung der Spulensätze und den Farbmarkierungen zur Bestimmung seiner Orientierung

5.1.8 Steckverbindungen, Kabel

An der Stirnseite des Trägers sind die Spulenenden auf 15-polige Cannon-steckerbuchsen gelötet.

Von den Gegenstücken der Buchsen gehen 12 paarweise verdrehte Kabel direkt zu den Anschlußsteckern der Integratoren, die entsprechend dem gewünschten Spulensatz eingesteckt werden. Durch das Verdrehen der beiden zu einer Spule gehörende Kabel werden durch magnetische Felder hervorgerufene Störungen vermindert. Es sind die gleichen Leitungen wie sie auf dem Spulenträger zwischen Spule und Steckverbindung benutzt werden. Für sie gilt dieselbe Abschätzung der Fehlflächen wie in Kapitel 7.3.1 auf Seite 80.

Die zwölf Kabel sind insgesamt zur Verminderung von elektromagnetischer Einstreuung mit einem einseitig geerdeten Metallschlauch abgeschirmt. Zum mechanischen Schutz wurde die Abschirmung mit einem Schrumpfschlauch umgeben.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

5.2 Kompensationsspulen

Kommt es bei der Stromversorgung des Magneten zu kleinen Schwankungen, so weisen die Spannungszeitintegrale bei der Messung der Feldverteilung ebenfalls Schwankungen auf. Sie haben maximal die gleiche relative Größe wie die Stromschwankungen, solange die Permeabilität μ_r innerhalb des Schwankungsbereiches konstant ist. Die dadurch bedingten Fehler sind statistisch über alle Meßwerte verteilt, da keine zeitliche Beziehung zwischen den Stromschwankungen und dem Beginn oder dem Ende der Integration besteht.

Diesen Fehler kann man kompensieren, indem man zusätzliche Spulen gleicher wirksamer Windungsfläche ($\int B da$) ortsfest in den Magneten legt. Deren Fläche entspricht dem Teil der Meßspule, der innerhalb des zu messenden Feldbereiches liegt. Diese weiteren Spulen müssen mit den verfahrenbaren Spulen so verschaltet werden, daß die Orientierung der Windungsflächen antiparallel sind. Die durch Stromschwankungen entstehenden Spannungen erhalten wegen der anderen Orientierung entgegengesetzte Vorzeichen und heben sich dadurch auf. Das beim Messen durch ein örtlich unterschiedliches Feld bedingte Spannungintegral entsteht nur in der bewegten Spule. Die ruhende Spule, die **Kompensationsspule**, liefert dann keinen Beitrag zum Spannungszeitintegral.

Die Träger der Kompensationsspulen bestehen aus zylinderförmigem, 2 mm hohem Plexiglas. In einer von außen angebrachten radialen Vertiefung sind Drähte mit 0,1 mm Durchmesser aufgewickelt. Der Durchmesser der jeweiligen Kompensationsspule ist so gewählt, daß etwa einhundert Windungen das gleiche $\int B da$ haben wie die zugehörige Spule auf dem Träger (Abbildung 5.7).

Der Nullabgleich zwischen den Kompensationsspulen und den Meßspulen wird durchgeführt, indem man die Spulen gegensinnig in Reihe schaltet und sie gemeinsam in ein Magnetfeld hält, dessen Erregerstrom sich ändert. Auf 1% kann man die Kompensationsspulen abgleichen, indem man eine Wicklung auf- oder abwickelt. Den Restabgleich erreicht man durch eine Änderung der Größe der letzten Wicklung. Sie wird oben auf der Kompensationsspule in der benötigten Größe fixiert.

Die Benutzung der Kompensationsspule ist nur sinnvoll, wenn man Felder an verschiedenen Orten mißt. Nach einem Spulenflip muß die Orientierung der Kompensationsspule ebenfalls umgedreht werden, damit die Orientierung der Flächen der beiden Spulen wieder antiparallel ist. Ansonsten würde sich der eigentlich zu kompensierende Fehler verdoppeln.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

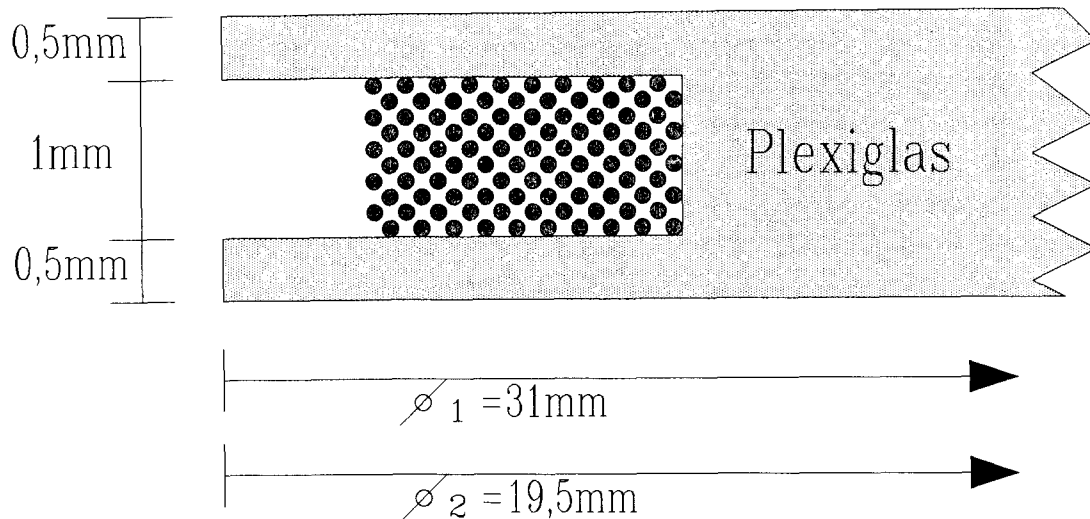


Abbildung 5.7: Schnitt durch einen Randbereich der Kompensationsspule, die kleinen Kreise stellen die 100 Windungen dar, die beiden angegebenen Durchmesser sind für die zwei verschiedenen großen wirksamen Spulenflächen im homogenen Teil und im Streufeldbereich des Magneten

5.3 Positioniervorrichtung

Die Positioniervorrichtung wurde von der Firma Franke aus Aalen geliefert. Die Vorrichtung lässt sich in drei Teile gliedern, in den mechanischen Teil, der sich mit den beiden Zweiachsentiche befaßt, in den elektronischen Teil, der die Tischsteuerung umfaßt, und in den Teil für die Sicherheitsschleife.

5.3.1 Zweiachsentiche

Der Spulenträger wird von zwei Tischen, die je in zwei Achsen verfahrbar sind, im Polspalt an den gewünschten Stellen positioniert. Die Tische sind fest auf Granitplatten verschraubt, die wiederum jeweils auf drei Justierfüßen gelagert sind. Dadurch können die beiden Tische parallel und in gleicher Höhe zueinander einjustiert werden. Nach dem Justieren des Magneten zwischen den Tischen bewegen sie sich nur noch parallel zu dessen x, y -Ebene. Je zwei weitere Justierfüße dienen der Fixierung der Platten nach der Ausrichtung. Alle Justierfüße stehen auf Betonquadern, um auftretende Schwingungsamplituden gering zu halten und eine angenehme Arbeitshöhe zu ermöglichen (Abbildung 5.8).

Die Tische werden von Schrittmotoren über Spindeln bewegt. Die Achsen haben dabei einen Verfahrweg von 1000 mm horizontal und 160 mm

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

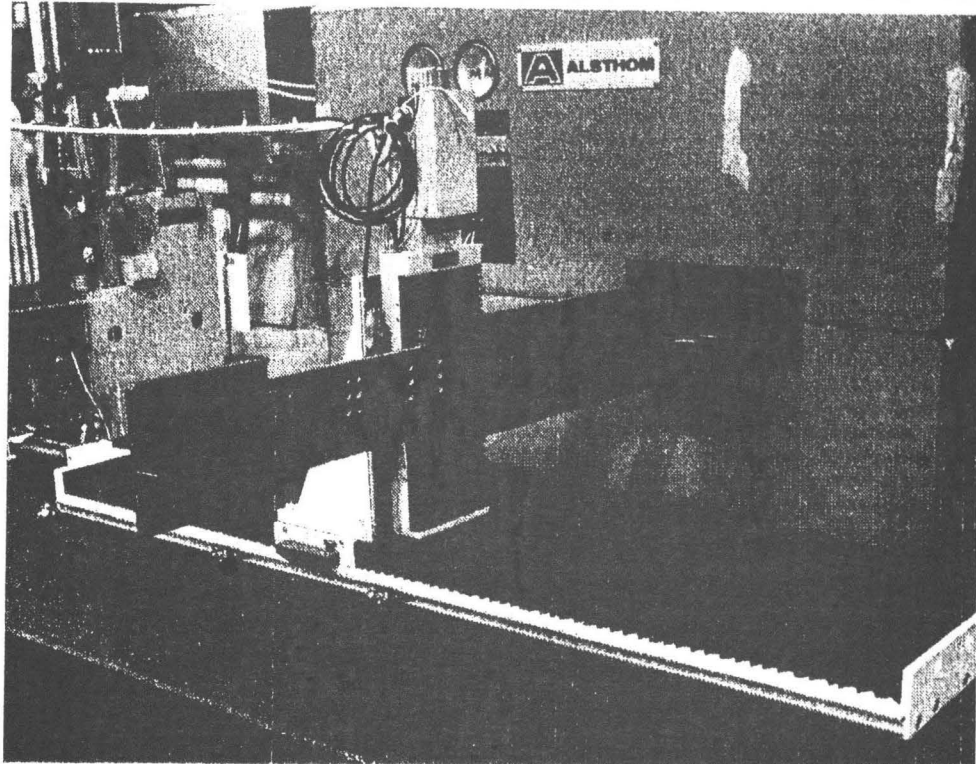


Abbildung 5.8: Foto eines der beiden Zweiachststische. Auf den horizontalen Achsen fahren die vertikalen Achsen. An ihnen wird eine Aufnahme für den Spulenträger befestigt.

vertikal. Die beiden horizontalen Achsen sind vom Hersteller mit B und C, die beiden vertikalen Achsen mit V und W bezeichnet. Die vertikalen Achsen haben zusätzlich Bremsen, die die Spindeln festhalten, sobald sich die Motoren nicht mehr drehen. Die Genauigkeit mit der Positionen reproduzierbar angefahren werden können, liegt bei 0,01 mm. Die Positioniergenauigkeit wurde mit einem Laserinterferometer überprüft [Krol 88]. Wegen des Spindelspiels müssen die Tische für diese Genauigkeit immer von derselben Richtung aus positioniert werden.

5.3.2 Tischsteuerung

Die Tische werden von Schrittmotoren der Firma Berger-Lahr bewegt, die durch eine elektronische Steuerung kontrolliert werden. Die Steuerung ist

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

in einen programmierbaren Elektronikteil und in einen Leistungselektronikteil unterteilt. Die Elektronikeinheit wurde dabei von der Firma S + M Elektronik hergestellt, während die Leistungseinheit von der Firma Midtex stammt [SM 88].

Jede Tischachse hat einen elektronischen Referenzpunktschalter. Er wird zur Positionsbestimmung nach jedem Anschalten der Steuerung angefahren. Werden die Tische von dem Referenzpunkt wegbewegt, addiert oder subtrahiert die Steuerung, je nach Fahrtrichtung, die an die Motoren gegebenen Impulse. Für eine Umdrehung des Motors sind 1000 Impulse notwendig. Die Steuerung berechnet aus diesen Daten und der Spindelsteigung die aktuelle Position der Tische. Elektronische Schalter verhindern, daß etwa bei falscher Positionsangabe, die Tische über das Spindelende hinausgeschoben und dabei beschädigt werden. Wird ein Endschalter angefahren, bricht die Steuerung die Positionierung ab. Je einer der Endschalter pro Achse ist gleichzeitig der Referenzpunktschalter. Die Ausschaltpunkte der Endschalter lassen sich an den einzelnen Achsen um einige cm variieren.

Die Bedienung der Steuerung erfolgt über Menüs, die auf einem Bildschirm angezeigt und über eine Tastatur ausgewählt werden. Für Tischbewegungen stehen in den Menüs zwei Betriebsarten zu Verfügung.

Bei der ersten Betriebsart wird die anzufahrende Tischposition manuell eingegeben. Bei Positionsangaben für mehrere Achsen können diese auf ein Startsignal hin synchron verfahren werden.

Die zweite Betriebsart besteht in der Programmierung der Steuerung. Das Programm ist nach Satznummern geordnet. Jeder Satz kann mehrere Befehle enthalten. Die Steuerung stellt eine Vielzahl von Befehlen bereit. Wichtig für die Anwendung in diesem Meßaufbau sind Sprung-, Positionier- und Geradeninterpolationsbefehle. Durch die Geradeninterpolation wird eine synchrone Bewegung der Achsen und das gleichzeitige Erreichen der gewählten Positionen aller Achsen möglich. Die Verfahrgeschwindigkeit orientiert sich an der zurückzulegenden Strecke, an der als Obergrenze gewählten Verfahrgeschwindigkeit v_{max} und an der eingestellten Beschleunigung. Die Beschleunigung wird in der Steuerung durch zwei Parameter, die "Eillaufgeschwindigkeit" und die "Rampe", bestimmt. Die Eillaufgeschwindigkeit v_{eil} ist die höchste zulässige Geschwindigkeit der Tische. Sie ist in Hz, der Anzahl der Impulse an den Motor pro Sekunde, angegeben. Über die Anzahl der Impulse pro Umdrehung des Motors und die Spindelsteigung errechnet sich der zurückgelegte Weg pro Zeit, das heißt die Geschwindigkeit v . Die Rampe gibt an, nach wievielen Impulsen diese Geschwindigkeit erreicht wird. Ist durch ein Programm eine Verfahrgeschwindigkeit festgelegt, die kleiner als die Eillaufgeschwindigkeit ist, bricht die Beschleunigung beim Erreichen der Verfahrgeschwindigkeit ab. Die Größe der Beschleunigung ist davon nicht betroffen (Abbildung 5.9). Die Verzögerung hat den gleichen Absolutwert wie die Beschleunigung.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

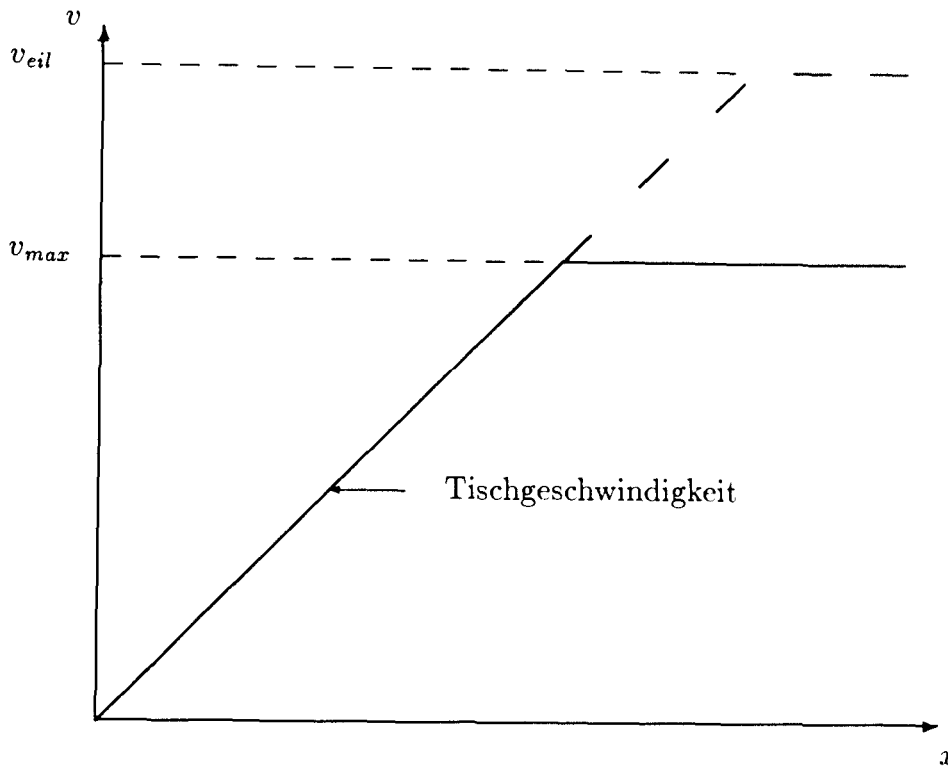


Abbildung 5.9: Dieses Bild stellt die Abhängigkeit der Tischgeschwindigkeit v von der zurückgelegten Strecke x dar.

Reicht die zurückzulegende Strecke für das Erreichen der maximalen Geschwindigkeit nicht aus, so wird die Beschleunigung nach der Hälfte der Strecke abgebrochen und ab dort gebremst (Abbildung 5.10).

Die Programme können entweder über eine RS 232 Schnittstelle von einem Rechner oder in einem mitgelieferten EPROM gespeichert und von dort wieder ausgelesen werden. Außerdem ist es möglich, vom Rechner aus ein gerade auf die Steuerung übertragenes Programm zu starten.

Eine zusätzliche Software ermöglicht eine Statusabfrage der Steuerung sowie das Auslesen und Beschreiben von Registern über die Schnittstelle. Die wichtigsten Statusmeldungen umfassen

- die Abfrage des Menüs, in dem sich die Steuerung gerade befindet,
- die Meldung, ob seit dem Einschalten die Referenzpunkte angefahren wurden,
- eine Fehlermeldung und

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

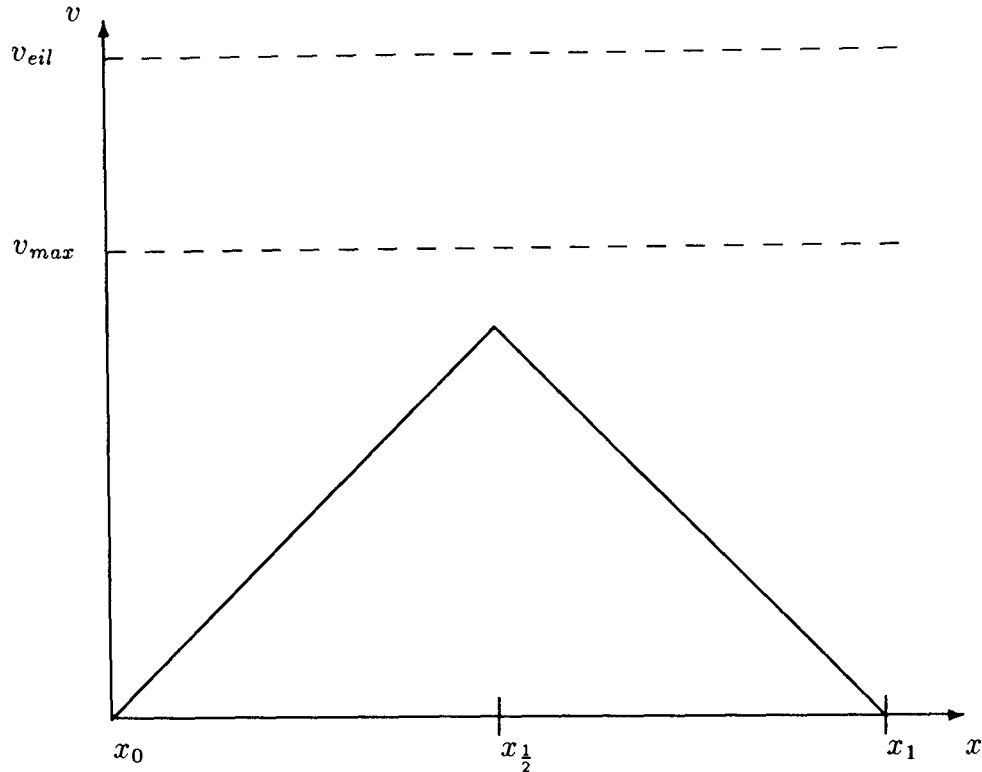


Abbildung 5.10: Bis zum Erreichen des Ortes $x_{\frac{1}{2}}$ wird der Tisch beschleunigt, danach bis x_1 gebremst.

- das Ende eines Positioniervorgangs.

Die auslesbaren Register können durch einen Programmbefehl mit den Achsenpositionen oder mit anderen Zahlen belegt werden.

In einem weiteren Menü wird die Einstellung für die Datenübertragung über die RS232-Schnittstelle gewählt. In einem anderen Menü sind alle durch die Bauart der Tische festgelegten Parameter eingegeben (Tabelle 10.5 auf Seite 113). Dies ermöglicht eine Anpassung an verschiedene Motorarten, Spindelsteigungen und zu bewegende Gewichte.

5.3.3 Sicherheitsschleife

Zwischen der programmierbaren Elektroneinheit und der Leistungselektronik besteht eine Verbindung, über die ein Relais die separate Stromversorgung der Endstufen einschaltet. Im eingeschalteten Zustand fließt dort ein Strom von 100 mA. Wird diese Leitung unterbrochen, stoppen

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

die Motoren sofort. Dadurch wird eine zusätzliche Sicherheitsabschaltung geschaffen, die die des Herstellers ergänzt. Die Abschaltung wird durch mechanische Schalter, die bei Berührung einen Kontakt öffnen, erreicht. Sie können an jeder beliebigen Stelle der Achsen befestigt werden. An jeder Achse werden zwei dieser Schalter montiert, so daß je ein Anfangs- und Endpunkt des Fahrweges festgelegt sind.

Alle Kontakte in dieser Verbindung sind in Reihe geschaltet. Damit ein auf einen Schalter aufgefahrener Tisch wieder bewegt werden kann, muß die Sicherheitsschleife (Interlockschleife) überbrückt werden. Dies ist für jede einzelne Achse mit einem Taster möglich. Liegen die Referenzpunkte außerhalb des durch die Sicherheitsschalter festgelegten Bereiche, müssen beim Referenzpunktsuchlauf der Steuerung die Taster ebenfalls gedrückt werden. Dabei darf der Spulenträger nicht auf dem Tisch liegen.

Falls die Tische auf den beiden Seiten des Magneten nicht synchron verfahren, zum Beispiel durch Unterbrechung eines Motorkabels, können sie den aufliegenden Spulenträger verwinden und damit beschädigen. Zur Kontrolle ist deshalb auf der einen Seite ein Laser montiert, der bei synchronem Verfahren der Achsen auf einen Phototransistor auf der anderen Seite leuchtet. Dadurch wird über ein Relais die Sicherheitsschleife geschlossen. Unterscheiden sich die Positionen der Achsen um etwa 4 mm, unterbricht das Relais die Schleife (Abbildung 5.11).

Die Unterbrechung der Sicherheitsschleife wird jedoch von dem programmierbaren Teil der Steuerung nicht registriert. Sie läuft unverändert weiter, ohne daß ein Fehler gemeldet und an den Rechner weitergegeben wird. Um dies zu ändern, wurde eine Schaltung installiert, die über einen 10 Ω -Widerstand bei einem Strom von 100 mA in der Sicherheitsschleife eine Spannung von 1 V abgibt. Erkennt die Schaltung diese Spannung nicht mehr, das heißt, ist die Schleife unterbrochen, wird an deren Ausgang eine Spannung im Bereich von +10 V bis +30 V mit 8 mA angelegt. Dieser Ausgang der Schaltung dient als Signaleingang an einer I/O-Karte (Input/Output-) der Steuerung. Jedes an die Steuerung übertragene Programm fragt den an die Schaltung angeschlossenen Eingang auf der I/O-Karte ab. Hat er eine Spannung über +10 V, wird vom Programm ein Register auf 1 gesetzt, hat er eine Spannung unter +10 V, bleibt das Register auf 0. Vom Computer wird bei jedem Zugriff auf die Steuerung dieses Register abgefragt und entsprechend seinem Wert bearbeitet¹.

¹Im EPROM ist ein Programm (Nr. 08) abgespeichert, das denselben Eingang abfragt. Es gibt auf den Bildschirm der Steuerung die Meldung, ob die Sicherheitsschleife offen oder geschlossen ist.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

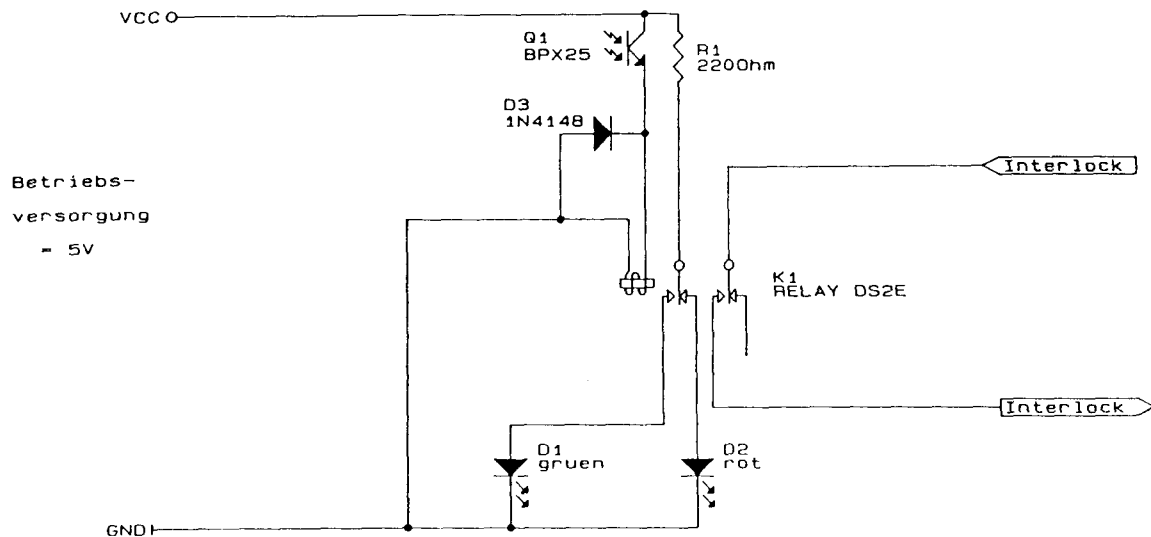
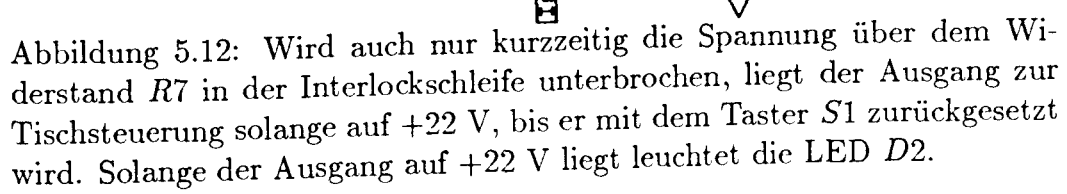


Abbildung 5.11: Trifft der Laserstrahl auf den Phototransistor $Q1$, schließt das Relais $K1$ die Interlockschleife und die grüne LED $D1$ leuchtet, ansonsten ist die Schleife unterbrochen und die rote LED $D2$ leuchtet.

Ist die Unterbrechung nur von kurzer Dauer, wird zum Beispiel der Laserstrahl für kurze Zeit gestört, so muß das Signal am Ausgang der Steuerung festgehalten werden, bis es ausgewertet worden ist. Dafür ist ein Flip-Flop als Speicher in die Schaltung eingebaut. Zurückgesetzt wird es mit einem Taster. Eine rote Leuchtdiode (LED) zeigt die aufgetretene Unterbrechung an (Abbildung 5.12).



KAPITEL 5. MESSAUFBAU

5.4 Systemvoltmeter

5.4.1 Kennzeichen der Systemvoltmeter

Für die Messungen der Spannungszeitintegrale aus den Spulen, der Hallspannung, der Kühlwassertemperaturen und einer zu einem Strom proportionalen Spannung werden sieben Systemvoltmeter 7061 der Firma Schlumberger eingesetzt. Sie sind mit einem Speicher ausgerüstet, der bis zu 8000 Meßwerte aufnehmen kann. Zwei Geräte sind mit Scannern ausgestattet, die zusätzlich zu zwei vorhandenen Anschlüssen von Meßleitungen je acht weitere erlauben.

Die Geräte verfügen über eine IEEE-488 Schnittstelle. Diese Schnittstelle besitzt acht parallele Datenleitungen, drei Steuerleitungen, die für die Kommunikation zwischen den beteiligten Geräten sorgen sowie fünf Leitungen für allgemeine Schnittstellensteuerung. An eine Schnittstelle können bis zu 14 Geräte angeschlossen werden. Zu deren Unterscheidung wird jedem Gerät eine bestimmte Adresse zugeteilt. Alle internen Funktionen können ferngesteuert werden. Über eine serielle oder parallele Abfrage (serial poll, parallel poll) kann eine Bedienungsanforderung des Gerätes (service request = SRQ) festgestellt werden. Mit diesen Geräten können Spannungen, Ströme und Widerstände gemessen werden [Schl 88]. Durch zusätzliche Widerstandsthermometer (PT 100) sind Temperaturen meßbar. Dafür ist intern ein Programm vorgesehen, das die gemessenen Widerstände in Temperaturen umrechnet und als solche ausgibt.

5.4.2 Spannungsintegration

Die Systemvoltmeter sind mit der Möglichkeit, eine Spannung zu integrieren, ausgerüstet. Die Integration kann auf ein Triggersignal hin gestartet und auf ein anderes hin gestoppt werden. Weiterhin kann eine feste Integrationszeit vorgewählt werden.

Für diese Integrationsanwendung ist ein als Zusatz erhältlicher neuer interner Quarztaktgeber eingebaut. Der vorher verwendete Taktgeber hat sich auf die Frequenz von 50 Hz der Netzversorgung bezogen. Die auftretenden Frequenzinstabilitäten haben sich direkt auf die Genauigkeit der Meßwerte der Spannungszeitintegrale ausgewirkt, während für eine Spannungsmessung ein präziser Quarztaktgeber nicht notwendig ist. Intern wird bei diesen Voltmetern eine Spannung gemessen, indem die Spannung über die Meßzeit integriert und nach dem Ende der Messung durch die Zeit dividiert wird. Die Dauer der Integration und die aufgezeichnete Meßzeit wird durch denselben Taktgeber bestimmt. Bei der Division heben sich die durch die Schwankungen der Taktfrequenz bedingten Fehler auf. Für die Integration bleibt der Fehler aber erhalten.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

Nach Herstellerangaben ist bei gleichbleibender Temperatur die Konstanz der Schwingungsfrequenz jedes einzelnen Quarzes bei 40 MHz besser als 10^{-6} über einen Zeitraum von 24 Stunden. Die Quarze der verschiedenen Geräte haben zueinander eine maximale relative Frequenzabweichung von $\pm 10^{-4}$ [Schl 88]. Diese relative Abweichung eines jeden Quarzes ändern sich zeitlich nicht.

In dieser Größenordnung liegt auch der relative Fehler der Integrale zwischen den Geräten. Dies wurde durch eine Meßreihe festgestellt. Dazu wurde die Spannung eines Weston-Elementes (1,0183 V) von allen Meßgeräten gleichzeitig integriert. Die verschiedenen Integrationszeiten variierten zwischen 5 s und 30 s (Dies sind typische Integrationszeiten für die Magnetfeldmessung.). Die Meßwerte schwankten zwischen den einzelnen Geräten um $\pm 2 \times 10^{-4}$ bezogen auf den Mittelwert. Auch nach mehrmaliger Wiederholung der Meßreihen haben sich die Abweichungen der Meßwerte für keines der Geräte geändert. Die relative Abweichung der Schwingungsfrequenz von der Sollfrequenz im Bereich von 10^{-4} ist im Zeitraum von 24 Stunden nicht zeitabhängig. Allerdings sind diese Abweichungen zu groß für die geforderte Meßgenauigkeit im Feldintegral.

5.4.3 Korrektur der Spannungsintegration

Durch die stabile Frequenz der Quarze lassen sich Korrekturfaktoren für jedes Systemvoltmeter bestimmen. Diese Faktoren kompensieren die Abweichung der Quarze untereinander. Mit ihnen sind die gemessenen Spannungsintegrale zu multiplizieren. Man erhält so Meßwerte mit geringen Ungenauigkeiten.

Zur Bestimmung der Korrekturfaktoren wird zum einen die Spannung eines Weston-Elements gemessen, zum andern wird von den Meßgeräten über die Zeit von 5 s integriert. Bei dieser Integrationszeit wird vom Voltmeter automatisch die höchstmögliche Auflösung gewählt. Die Integration durch alle Geräte wird vom Computer aus gleichzeitig gestartet. Nach der auf dem Meßgerät eingestellten Zeit wird der Meßvorgang von jedem Gerät automatisch beendet. Da diese eingestellte Integrationszeit von den internen Taktgebern abhängt, sind in den Meßergebnissen die Frequenzabweichungen der Quarze zueinander enthalten. Der Korrekturfaktor für jedes Gerät wird aus dem gemessenen Integralwert und der gemessenen Spannung, die mit der Integrationszeit multipliziert wird, errechnet. Die gemessene Spannung, multipliziert mit der Integrationszeit, wird als Normwert bezeichnet. Für die Korrekturfaktoren $korr_k$ der zu den Spulen k gehörenden Integratoren gilt

$$\frac{\text{Spannung} \times \text{Zeit}}{\text{Integralwert}_k} = \frac{\text{Normwert}}{\text{Integralwert}_k} = korr_k = \frac{N}{I_k}.$$

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

Die Bestimmung des Korrekturfaktors ist in einem Programm auf dem alle Systemvoltmeter bedienenden Rechner automatisiert. Das dazu benötigte Weston-Element ist, gegen Temperaturschwankungen geschützt, zusammen mit den Meßgeräten in einem Rahmengestell eingebaut.

5.4.4 Fehlerbetrachtung der Korrekturen

Die Ungenauigkeit eines Integrationswertes setzt sich aus verschiedenen Teilen zusammen.

- Die Unbestimmtheit in der Spannungsmessung und der Frequenzänderung *eines* Quarzes werden dabei zusammengefaßt.
- Die Abweichung der verschiedenen Quarzfrequenzen von einem Gerät zum anderen ist die zu kompensierende Ursache.

Ein unterschiedlicher Zeitversatz für das Startsignal verursacht bei der Spannungsintegration keinen Fehler, wenn die Spannungsquelle stabil genug ist. Die Spannungsschwankungen des Weston-Elements liegen außerhalb der Meßgenauigkeit des Systemvoltmeters. Bei 1000 Spannungsmessungen lag die relative Abweichung bei 5×10^{-6} .

Bei einer Spannung von bis zu 2 V ist bei einer siebenstelligen Anzeige (sieben Digits) eine Meßungenauigkeit von “ $\pm(7\text{ppm} + 2\text{Digits})$ ” angegeben. Dies bedeutet, die Meßungenauigkeit beträgt 7×10^{-6} des Wertes der Anzeige zuzüglich 2 Zählimpulse auf der letzten angezeigten Stelle. Für eine auf sieben Stellen genau angezeigte Spannung des Weston-Elements von 1,0183 V ergibt sich eine Meßungenauigkeit von $\pm 7,3 \times 10^{-6}$ V. Wird diese Spannung mit der Integrationszeit von 5 s multipliziert, so beträgt die absolute Ungenauigkeit des Normwertes $3,66 \times 10^{-5}$ Vs.

Da die Schwankung der Frequenz eines Quarzes mit 10^{-6} genauer ist, als die der Spannungsmessung, wird die Ungenauigkeit der Integralmessung vorwiegend durch die Spannungsmessung bestimmt. Sie beträgt $\pm 7,3 \times 10^{-6}$. Nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich ein Gesamtfehler für den Korrekturfaktor Δk_{corr_k} von

$$\Delta k_{\text{corr}_k} = \sqrt{\Delta N^2 \frac{1}{I_k^2} + \Delta I_k^2 \left(-\frac{N}{I_k^2}\right)^2} = 7,5 \times 10^{-6},$$

wobei

$$\Delta N = 3,66 \times 10^{-5} \text{Vs},$$

$$N = 5 \text{Vs},$$

$$\Delta I_k = 7,3 \times 10^{-6} \text{Vs},$$

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

$$I_k = 5Vs.$$

Zur Überprüfung dieser Überlegungen werden die Korrekturfaktoren wie beschrieben bestimmt. Ein Programm läßt eine Spannung von etwa 1 V über verschieden einstellbare Zeiträume von den Systemvoltmetern integrieren. Die Ergebnisse werden mit den Korrekturfaktoren multipliziert. Ihre Abweichung vom Mittelwert, der sich aus den Ergebnissen aller Geräte ergibt, wird berechnet und ausgedruckt. Bei Messungen über einen ganzen Tag hinweg waren die relativen Abweichungen vom Mittelwert nicht größer als 7×10^{-6} . Dies ist der aus dem Fehler des Korrekturfaktors und dem Fehler des Integrals zusammengesetzte Wert. Damit ist überprüft, daß der berechnete Wert die obere Grenze der Meßunsicherheit ist.

Die größten Schwankungen einer Quarzfrequenz werden durch Temperaturveränderungen bewirkt. Daher muß während der Messungen darauf geachtet werden, daß die Meßgeräte keinen Temperaturunterschieden $\Delta T > \pm 1^\circ \text{C}$ ausgesetzt sind.

Zur Temperaturüberwachung stehen Widerstandsthermometer zur Verfügung. Sie sind zusammen mit den Meßgeräten in einem Stahlgestell eingebaut. Im Normalfall sind kurzzeitige Temperaturschwankungen nicht zu erwarten, da die Halle, in der sich der Meßaufbau befindet, ein großes Volumen hat und damit träge auf äußere Temperaturänderungen reagiert.

5.5 Strommessung

Der Nennstrom für die Dipolmagnete beträgt 5000 A. Um ihn mit einer Genauigkeit von 10^{-5} des Meßwertes zu bestimmen, steht ein Nullflußstromwandler (Direct-Current Current-Transformer) der Firma Holec (Typ 5000 SH) zur Verfügung. Der Leiter W_1 mit dem zu messenden Strom I_1 führt durch einen Ring aus ferromagnetischem Material. Der Ringkern ist mit zwei Spulen W_2 und W_3 umwickelt (Abbildung 5.13).

Durch eine Stromänderung in W_1 wird der magnetische Fluß in dem Ring geändert. Dadurch wird in W_3 eine Spannung induziert, die als Eingangsspannung für den Verstärker V dient. Er regelt den Strom I_2 mit der Wicklung W_2 , so daß im Ring ein gleich großer magnetischer Fluß, wie der durch I_1 erzeugte, entsteht. Die beiden Flüsse haben entgegengesetzte Vorzeichen, so daß sie sich gegenseitig aufheben. Dann sind I_1 und I_2 zueinander proportional. Über den Widerstand R wird eine zu I_2 und damit auch zu I_1 proportionale Spannung abgegriffen. Sie wird so verstärkt, daß bei einem Strom I_1 von 5000 A die Ausgangsspannung bei 10 V liegt. Diese Spannung wird dann mit einem Systemvoltmeter gemessen. Im Computer wird sie in den betreffenden Stromwert umgerechnet.

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

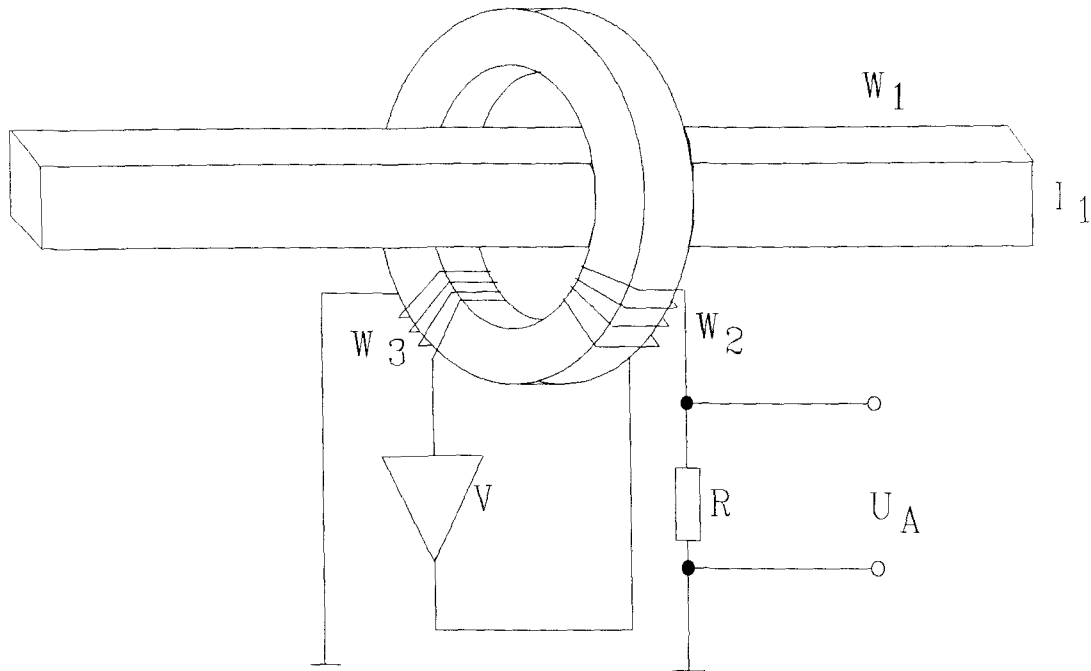


Abbildung 5.13: Nullflußstromwandler zur Bestimmung des Stromes I_1 bestehend aus einem ferromagnetischen Ring, um den zwei Spulen W_2 und W_3 gewickelt sind, einem Verstärker V und einem Widerstand R .

Test- und Kalibrationsverfahren für dieses Gerät sind in den Diplomarbeiten von [Bale 89, Schn 89] beschrieben.

5.6 Kernspinresonanzsonde

Für hochpräzise Magnetfeldmessungen steht von der Firma Metrolab eine Kernspinresonanzsonde des Typs PT3020 bereit. In einem Überrahmen, in dem sich die Spannungsversorgung befindet, ist die Elektronikeinheit eingebaut. Sie dient der Auswertung der Resonanzsignale, der Spannungsversorgung der anderen Elemente und der Kommunikation mit dem Computer über eine IEEE-488 Schnittstelle. Alle vorgesehenen Funktionen können entweder über die Schnittstelle oder über Drehpotentiometer und Schalter am Gerät bedient werden. Der gemessene Feldwert wird wahlweise in Tesla oder in der zugehörigen Resonanzfrequenz angezeigt. Das Resonanzsignal kann man außerdem an einem dafür vorgesehenen Ausgang mit einem Oszilloskop beobachten. Zusätzlich meldet eine grüne Leuchtdiode, wenn die Resonanz gefunden wurde.

Über ein Kabel ist ein Vorverstärker an die Sonde angeschlossen. Er

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

darf sich im Gegensatz zur Elektronikeinheit in einem magnetischen Feld bis zu 1,5 T befinden. Dadurch kann die störungsempfindliche Strecke von der Sonde bis zum Vorverstärker kurz gehalten werden. Für die Felder von 0,045 T bis 2,1 T werden fünf Sonden mit verschiedenen Meßbereichen benutzt.

Es gibt drei verschiedene Möglichkeiten, mit der Kernspinresonanzsonde die Resonanzen zu bestimmen. Alle diese drei Moden können per Hand oder vom Computer aus eingestellt und bedient werden. Im Manual-Mode muß die Resonanzfrequenz vorgegeben werden. Diese Methode ist dann sinnvoll, wenn die Resonanz stark aufgeweitet oder durch andere fremde Signale so stark gestört ist, daß sie durch eine Automatik nicht mehr gefunden werden kann. Im Auto-Mode braucht man die Frequenz nur auf $\pm 5\%$ der Resonanzfrequenz vorzugeben. Die Elektronik sucht selber in diesem Bereich die exakte Frequenz und zeigt sie dann an. Im Search-Mode sucht die Elektronik beginnend mit dem niedrigsten Wert der Sonde deren ganzen Frequenzbereich sooft durch, bis eine Resonanz gefunden wurde. Sobald die Resonanz gefunden ist, wird diese Resonanzfrequenz beibehalten. Ändert sich das Feld um weniger als 10^{-2} des Wertes pro Sekunde, wird die Frequenz im Auto- und im Searchmode dem aktuellen Feldwert entsprechend nachgeregelt. Die gefundene Resonanzfrequenz kann in jedem Mode über die Schnittstelle abgefragt werden.

Der maximale Feldgradient, bei dem das Signal-Rausch-Verhältnis noch das Erkennen der Resonanz zuläßt, liegt, abhängig vom Feldwert, zwischen $2 \times 10^{-6} \frac{\text{T}}{\text{m}}$ und $1,3 \times 10^{-5} \frac{\text{T}}{\text{m}}$. Die absolute Genauigkeit ist mit 1×10^{-5} des Meßwertes, die relative Genauigkeit mit 1×10^{-7} des Meßwertes angegeben. Die Auflösung liegt mit 1×10^{-7} T entsprechend bei 1 Hz [Metr 86]. Eine Überprüfung der Meßgenauigkeit ist nicht möglich, da kein solch genau bekanntes Magnetfeld verfügbar ist.

5.7 Hallsonde

Die Messung mit der Hallsonde dient in diesem Meßaufbau nur einer groben Bestimmung des Magnetfeldes. Dabei reicht eine Auflösung von einigen Prozent aus. Sie wird benötigt, um dem Benutzer der Meßapparatur einen Anhaltspunkt zu geben, welches Feld vorliegt, oder in Feldbereichen mit großen Gradienten zu messen. Außerdem kann sie benutzt werden, um den richtigen Bereich der Kernspinresonanzsonde auszusuchen, oder den automatischen Suchlauf der zugehörigen Elektronik zu verkürzen. Dazu wird die Frequenz beziehungsweise der entsprechende Feldwert, ab dem gesucht werden soll, um einige Prozent kleiner gewählt als das durch die Hallsonde gemessene Feld.

Die Stromversorgung der Sonde ist fest auf 300 mA eingestellt. Bei

KAPITEL 5. MESSAUFBAU

diesem Strom wurde die Hallsonde auch kalibriert.

Ihre Magnetfeld-Spannung-Beziehung ist nur in erster Näherung linear. Für eine genauere Feldmessung, zum Beispiel die Vermessung von Randfeldern, wurde diese Beziehung durch ein Polynom 25-ten Grades angepaßt. Damit können Genauigkeiten bis zu 10^{-4} des gemessenen Feldwertes erreicht werden, wenn die Sonde temperaturstabilisiert ist [Sage 88].

5.8 Computerumgebung

Für die Steuerung, Auswertung und Datenverwaltung wird ein Computer der Firma Hewlett Packard, Familie 9000, Serie 330 verwendet. Er besitzt einen 68020 Mikroprozessor und einen Arithmetikcoprozessor der Firma Motorola. Das installierte Betriebssystem heißt UNIX System V. Für den Meßaufbau steht eine RS232-Schnittstelle zur Tischsteuerung und eine IEEE-488-Schnittstelle für die Systemvoltmeter und die Kernspinresonanzsonde zur Verfügung. Weitere vorhandene Schnittstellen werden für andere Meßaufbauten und Terminals benötigt. An den Rechner sind zwei Festplatten mit je 300 Megabyte Speicherkapazität angeschlossen. Auf einer Platte befindet sich das Betriebssystem. Sie ist für den Benutzer nicht zugänglich. Auf der anderen Platte befindet sich unter anderem das Steuerprogramm für die Messung. Dort können auch die Meßdaten abgelegt werden. Zur Datensicherung sind zwei Kassettenlaufwerke und eine Bandstation angeschlossen.

Der Computer ist über ein Netzwerk (Local Area Network kurz LAN) mit einer Reihe anderer Computer verbunden, unter anderem auch mit einem Computer der Firma Hewlett Packard, Familie 9000, Serie 855 mit dem gleichen Betriebssystem. Dieser Rechner verwaltet eine Reihe von Festplatten. Auf einer dieser Platten werden, solange die Netzwerkverbindung besteht, die Meßdaten und die ausgewerteten Daten abgespeichert. Über diesen zweiten Computer stehen weitere Terminals zur Verfügung, über die auch der für die Messung zuständige Computer bedient werden kann.

Durch die Vernetzung sind Ausdrücke der Daten und Graphiken durch Laserdrucker, Lineprinter, Farbplotter und Farbdrucker möglich.

Für die Datensicherung steht ein vollkommen automatisiertes Sicherungssystem (Backupsystem) zur Verfügung.

Kapitel 6

Programmierung der Feldmessungen

Für die Kenndatenbestimmung der Magnete und die Anpassung der Magnete bezüglich dieser Daten zueinander ist, wegen der häufigen Messungen, ein automatisierter Meßablauf von Vorteil. Das Programm steuert alle Elemente des Meßaufbaus. Die gemessenen Daten werden aus den Meßgeräten ausgelesen, ausgewertet und verwaltet. Das dazu geschriebene Programm hat eine Quelltextgröße von 430 Kilobyte und ist in 93 Programmteile gegliedert.

6.1 Programmierumgebung

Das Programm ist zum größten Teil in der Programmiersprache **C** geschrieben. **C** ist eine modular aufgebaute Hochsprache. Für sie existiert ein Programmpaket (Device Independent Library kurz **DIL**), das die Bedienung der IEEE-488 Schnittstelle des Rechners ermöglicht. Die einzelnen Teile dieses Paketes können in die selbstgeschriebenen **C**-Programme mit eingebunden werden.

Ein Programmteil ist in **FORTRAN** geschrieben. Er ist mit einigen Änderungen aus einem Buch zur Datenanalyse [Bevi 68] entnommen. **FORTRAN**-Programme lassen sich ebenfalls in **C**-Programme einbinden.

Im Betriebssystem **UNIX** kann mit **Shellscripts** programmiert werden. Diese Shellscripts bestehen unter anderem aus Betriebssystembefehlen, Schleifen und Kontrollstrukturen. Da man mehrere Shellscripts parallel und von verschiedenen Rechnern abarbeiten lassen kann, werden sie für die rechenzeitaufwendige Graphikauswertung verwendet. Das Meßprogramm wird dann nicht gestört.

UNIX stellt für die Programmierung eine Vielzahl von Hilfsmitteln bereit. Die Übersetzer (Kompilierer oder Compiler) für **C** oder **FORTRAN** in den vom Computer direkt lesbaren Maschinencode sind mit verschiedenen

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

Fehlererkennungen (Syntax-, Deklarationsfehler u.a.) ausgestattet. Für eine weitergehende Fehlerdiskussion existiert ein Programm "lint". Zur Kontrolle des Programmflusses und zum Erkennen logischer Fehler kann ein "Symbolischer Debugger" (Programmname xdb) benutzt werden. In ihm kann das geschriebene Programm in einzelnen Schritten oder in einzelnen selbstgewählten Abschnitten durchlaufen werden. An jeder Stelle kann man die *aktuellen* Werte von Variablen oder Adressen abfragen. Somit sind die Werte von Schleifenvariablen und logischen Abfragen direkt nachvollziehbar.

Ein "makefile" hilft beim Übersetzen des Programms, wenn es aus mehreren einzelnen Teilen besteht. Damit werden nur die seit dem letzten Übersetzen neu bearbeiteten Programmteile kompiliert und mit den schon vorhandenen Maschinencodes zusammengebunden. Dies spart Rechenzeit (Wartezeit), und es wird kein Programmteil vergessen. In der zugehörigen Datei stehen auch alle benötigten Optionen des Übersetzers. Einige Programmbibliotheken benutzen solche Optionen. In C können selber definierte Programmbibliotheken oder Konstantenlisten in mehrere Programmteile gleichzeitig eingebunden werden. Wird zum Beispiel eine dieser Listen geändert, so müssen alle die Programmteile, die diese Liste benötigen, neu übersetzt werden. Auch diese Abhängigkeiten berücksichtigt der "makefile".

Für die graphische Auswertung existiert ein Programm namens "igm" (Interaktiver Graphik Monitor). Es kann entweder interaktiv oder über ein Shellscript benutzt werden. Mit ihm sind Kurvendarstellungen in einem zweidimensionalen Koordinatensystem möglich.

Zur Programmtexterstellung wird ein in UNIX enthaltener bildschirmorientierter Editor (vi Editor) verwendet. Die Dateien mit den Meßdaten und den ausgewerteten Daten sind mit diesem Editor les- und veränderbar.

6.2 Programmierrichtlinien

Um die Programme übersichtlich zu gestalten, werden sich in dieser Arbeit an folgende Richtlinien eingehalten.

- Alle Hardware abhängigen Adressen stehen in einer Datei (gadr.c).
- Alle möglicherweise veränderbaren Konstanten sind jeweils an zentraler Stelle (in header-files) zusammengefaßt.
- Am Anfang eines jeden Programmteils steht eine kurze Erklärung seiner Aufgabe.
- Alle Benutzereingaben sind in einer Farbe dargestellt. Jeweils in einer anderen Farbe werden die Ausgaben eines Programmabschnittes angezeigt.

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

- Die Festplatte, auf die alle Dateien für Justier-, Meß- und Auswertedaten geschrieben werden, ist von einer Betriebssystemvariablen abhängig. Durch Änderung dieses Variablenwertes können die Daten auf einer beliebigen anderen Platte gespeichert werden.

In das Programm sind ausführliche Fehlermeldungen eingearbeitet. Bei Zugriffen auf Dateien und auf angeschlossene Geräte werden bei auftretenden Fehlern Meldungen ausgedruckt, die ihre Ursache angeben. Bei falschen Eingaben oder bei vergessenen Meßvorbereitungen wird der Benutzer darauf hingewiesen. Bei allen Fehlermeldungen wird der Programmteil, in dem der Fehler auftritt, angezeigt. Soweit möglich werden vom Programm Hinweise zur Fehlerbehandlung gegeben.

Alle gemessenen oder berechneten Daten und alle Justierdaten werden direkt nach ihrer Ermittlung oder Berechnung in einer mit dem Editor lesbaren Form abgespeichert. Dadurch entsteht kein Datenverlust durch einen möglicherweise später auftretenden Fehler. Die Meßdatendateien enthalten neben den Meßwerten auch alle weiteren Daten, die zur Auswertung nötig sind. Dadurch wird zwar mehr Speicherplatz beansprucht, doch entfällt das Suchen der zur Bearbeitung nötigen Dateien. Jeder Datensatz ist in sich autonom und auswertbar.

6.3 Programmstruktur

Für den Benutzer ist das Programm in Menüs geordnet. Unter den einzelnen Menüteilen befinden sich entweder weitere Menüs oder ausführbare Programmteile. Ruft der Benutzer die einzelnen Teile des Hauptmenüs nacheinander auf, so wird er durch einen vollständigen Meßablauf mit allen Vorbereitungen in der richtigen Reihenfolge geleitet. Da nicht jede Vorbereitung täglich oder bei jeder Messung (siehe zum Beispiel Bestimmung der Korrekturfaktoren der Systemvoltmeter) nötig ist, können oft einige Teile der Menüs übersprungen werden. Hat der Benutzer irrtümlich einen Teil übersprungen, so wird er durch Fehlermeldungen darauf aufmerksam gemacht. Die letzten Punkte des Hauptmenüs geben ihm einige nützliche Informationen zu Programm und dessen Ablauf.

Für die Programmierung im Rahmen dieser Arbeit äußert sich diese Struktur darin, daß zunächst eine große Anzahl von Hilfsprogrammen geschrieben werden mußte. Sie werden entweder direkt von Menüs oder von einigen wenigen Programmteilen aufgerufen, die den Ablauf der einzelnen Vorbereitungen, Messungen oder Auswertungen bestimmen. Dadurch entsteht eine Einteilung in Steuer- und Hilfsprogramme.

In den folgenden Abschnitten werden die in den Steuerprogrammen bearbeiteten Abläufe vorgestellt.

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

6.4 Meßvorbereitungen

6.4.1 Spulendaten

Die Spulendaten enthalten alle für die Messungen wichtigen Kenndaten. Dazu wird für jeden Spulenträger die Lage der Spule auf dem Träger, die Spulenanzahl, die Spulenlänge, die Spulenbreite, die kalibrierte Spulenfläche und die Windungszahl angegeben. Aus der Eingabe der Abstände der Mittelpunkte der Kreisbögen zwischen den Enden der Spulen wird die fehlende Fläche berechnet. Diese Daten werden unter \$MAGNET/spulentr_N.dat mit $N = A, B$ oder C je nach Träger abgespeichert. Sie können auch im Programm ausgelesen und angezeigt werden. (Programmteile: speichmenue.c, speichdatin.c, speichdatout.c, speichdatprt.c)

6.4.2 Einjustierung der Spulen in den Magneten

Die Spulen müssen im Magneten eine bekannte und definierte Lage haben. Dazu wird die Längsachse des Spulenträgers mit Hilfe der zwei Zweiachsentische parallel zur Strahlachse ausgerichtet. Dies geschieht außerhalb des Magneten, weil dort die Sicht auf den Träger nicht behindert ist. In dem Programmteil zur Einjustierung werden die Tische dazu nach einem Referenzpunktsuchlauf an die Position der Justiergeräte gefahren. Um die Parallelität zu erreichen, ist die Tastatur des Terminal so eingestellt, daß auf Tastendruck jede Achse in zwei verschieden grob einstellbaren Rastern verfährt. Die Belegung der Tasten wird auf dem Bildschirm angezeigt. Ist der Träger parallel einjustiert, wird er im Polspalt positioniert. Dort wird seine Mitte (sein Koordinatenursprung) in die Mitte (Linie $x = y = 0$) des Polspaltes gebracht. Dazu ist die Tastatur des Terminals so eingestellt, daß auf Tastendruck die Tischachsen nur parallel zueinander verfahren können. Ist die Justierung beendet, werden die Tischkoordinaten in einer Datei abgespeichert. Von dieser Position aus wird der Benutzer des Programms nach den freien Abständen zwischen dem Träger und dem Polspalt in Richtung der positiven und negativen x- und y-Achsen gefragt. Dadurch werden für die späteren Messungen die maximalen Verfahrwege festgelegt. Diese Daten werden ebenfalls in der selben Datei (\$MAGNET/spuljust.dat) abgespeichert und mit Datum versehen. (Programmteile: alle Programmteile, die mit "sm " beginnen und keyb.c für die Umstellung der Tastatur)

6.4.3 Initialisierung der Systemvoltmeter

Durch die Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten der Systemvoltmeter müssen diese an die verschiedenen Meßanforderungen angepaßt werden. Dies geschieht vom Computer aus (Programmteil: init.c). Bei dieser "grundsätzli-

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

chen" Initialisierung wird die Schnittstellenkommunikation zwischen Meßgerät und Rechner eingestellt, die Kanäle für die Meßleitungen bestimmt und der Meßgenauigkeitsbereich ausgewählt. Bei allen Systemvoltmetern wird ein Nullabgleich durchgeführt. Er eliminiert kleine Gleichstromabweichungen bis zu 2% des Maximalwertes des jeweiligen Meßbereiches. Eine eingestellte automatische Driftkorrektur gleicht alle 15 Minuten interne Drifts aus.

Wie im Kapitel 5.4.4 zur Korrektur der Spannungsintegration auf Seite 51 beschrieben, werden Korrekturfaktoren automatisch bestimmt. Sie werden zusammen mit dem aktuellen Datum in einer Datei (\$MAGNET-/int_korrekt.dat) abgespeichert. Alle diese Dateien werden zusätzlich für Stabilitätskontrollen der Taktfrequenz der Quarze in einem gesonderten Verzeichnis gesammelt und können zur Langzeitkontrolle genutzt werden.

6.5 Messungen

Die verschiedenen Messungen werden über ein Menü aufgerufen. Die Meßprogramme bestehen aus drei Teilen

- Bestimmung aller notwendigen vorbereitenden Daten
- Messung
- Datenerfassung

Die Messungen können mit allen auf den Spulenträgern befindlichen Spulensätzen ausgeführt werden.

6.5.1 Messung der Magnetisierungskurve

Vor Beginn der Messung der Magnetisierungskurve wird die Aktualität der Integratorkorrekturfaktoren geprüft. Der Programmbenutzer wird aufgefordert, die Korrekturfaktoren neu zu bestimmen, falls sie älter als einen Tag sind. Die Lagekoordinaten der einzelnen Spulen auf den Trägern werden vom Programm aus der Datei der Spuleneichdaten eingelesen. Zur Positionierung des Trägers und zur Bestimmung des maximalen Verfahrensweges werden außerdem die Justierdaten des Spulenträgers bezüglich des Magneten benötigt. Anschließend fragt das Programm über eine interaktive Eingabe weitere für die Messung relevante Daten ab und weist den Benutzer darauf hin, bei dieser Meßart keine Kompensationsspulen zu benutzen. Als nächstes muß der Benutzer die Bezeichnungen zu dem zu vermessenden Magneten und zu den dabei verwendeten Spulen eingeben. Für die Eingabe der verschiedenen Ströme, bei denen die Magnetisierungskurve

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

gemessen werden soll, sind zwei Möglichkeiten vorgesehen. Zum einen werden alle Ströme einzeln eingegeben. Zum anderen werden der Minimalstrom, der Maximalstrom und die Differenz, die zwischen zwei einzustellenden Strömen bestehen soll, eingegeben. Danach legt der Benutzer den Ort der Messung fest.

Um einen reproduzierbaren Ausgangszustand für den Magneten zu erreichen, stellt das Programm die Ströme nach einem festgelegten Zyklus ein. Ebenso wählt es die bei dieser Messung benötigten Einstellungen der Systemvoltmeter. Eventuelle noch vorhandene alte Meßwerte werden aus ihrem Speicher gelöscht.

Zu Beginn und am Ende der Messung werden die Kühlwassertemperaturen des Magneten im Vor- und Rücklauf gemessen. Beim ersten gewählten Strom wird das absolute Feld durch einen Spulenflip bestimmt. Während der Einstellung aller weiteren Ströme wird das Spannungszeitintegral gemessen. Vom letzten Strom aus wird nochmals der Anfangsstrom eingestellt. Dabei wird ebenfalls das Integral bestimmt. Bei diesem Strom wird ein zweiter Spulenflip durchgeführt. Die Meßwerte werden aus allen Meßgeräten ausgelesen, zusammen mit allen zusätzlich benötigten Daten abgespeichert und numerisch ausgewertet. Dieses Programm ist unter `mess.bista.c` zu finden. Nach Abschluß dieser Messungen geht das Programm in das aufrufenden Menü zurück.

Ein Ablaufdiagramm des Programmteils ist in der Abbildung 10.1 auf der Seite 103 dargestellt.

6.5.2 Messung der Feldkarte

Das Programm zur Messung der Feldkarte entspricht bis zur Eingabe der Stromwerte dem Meßprogramm der Magnetisierungskurve. Bis dorthin besteht nur ein Unterschied bezüglich der Kompensationsspulen. Sie sollen dann angeschlossen werden, wenn die Stromversorgung des Magneten für die Messung nicht stabil genug ist. Für jeden der eingegebenen Stromwerte wird die gesamte Feldkarte einmal gemessen. Das Programm gibt dabei den Ortsbereich aus den gespeicherten Justierdaten vor. Vom Koordinatenursprung aus wird ein Raster festgelegt, dessen Abstände in x- und y-Richtung eingegeben werden müssen. Der Koordinatenursprung selbst ist ein Rasterpunkt. Entlang diesem Raster wird der Spulenträger verfahren.

Wie bei der Messung der Magnetisierungskurve wird nun ein bestimmter Stromzyklus durchlaufen. Die Systemvoltmeter werden für ihre Meßaufgaben eingestellt. Ebenfalls werden zu Beginn und am Ende einer jeden Messung die Vor- und Rücklauftemperaturen des Kühlwassers des Magneten bestimmt. Nach Einstellen und Messen des Stromes beginnt die Messung der Feldkarte.

Vor dem Verfahren der Spulen beginnt die Spannungszeitintegration,

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

nach dem Verfahren stoppt sie. Begonnen wird die Messung in dem Quadranten mit positivem x - und negativem y -Wert. Zunächst fährt der Träger vom größten zum kleinsten x -Wert. Danach wird die y -Koordinate um eine Einheit erhöht und gleichzeitig die x -Achse zurückgefahren. Dabei fährt die x -Achse um einen kleinen Betrag weiter als durch den größten x -Rasterpunkt angegeben ist. Da bei diesem Zwischenwert nicht gemessen werden soll, stoppen die Integratoren hier nicht, sondern erst beim ersten Rasterpunkt. Das dient dazu, auch den ersten Rasterpunkt immer von der gleichen Richtung anzufahren. Dies wiederholt sich für jede Ebene. Beim Erreichen des Koordinatenursprungs wird zur Absolutfeldbestimmung die Spule gedreht. Nach dem Spulenflip wird die andere Hälfte des Rasters abgefahren. Vom letzten Punkt aus fährt der Träger wieder zum Startpunkt zurück. Dort wird die Spule nochmals gedreht.

Die Meßwerte werden aus den Meßgräten ausgelesen und zusammen mit den zur Auswertung wichtigen Daten abgespeichert. Die Auswertung erfolgt numerisch. Anschließend beginnt eine neue Messung für den nächsten Stromwert. Ist die Feldkarte bei alle Strömen gemessen worden, geht das Programm in das aufrufende Menü zurück.

Ein Ablaufdiagramm ist in Abbildung 10.2 auf der Seite 105 dargestellt.

6.5.3 Messung mit Kernspinresonanzsonde

Die Magnetfeldmessung mit der Kernspinresonanzsonde ist nur als Zusatz zu den beiden anderen Messungen vorgesehen. Sie dient als eigenständige Messung der Kontrolle des Spulenflips, das heißt der Absolutfeldbestimmung sowie einer Überprüfung der Drift der Integratoren. Wird die Messung mit der Kernspinresonanzsonde vor dem Aufruf einer der beiden vorher beschriebenen Messungen ausgewählt, so wird deren Ergebnis als Kommentar mit in die Datei der anderen Messungen aufgenommen. Ansonsten wird der gemessene Feldwert nur angezeigt.

Zunächst wird sichergestellt, daß die richtige Sonde für den Feldbereich angeschlossen ist. Dieser Programmteil kann übersprungen werden.

Das Programm bedient sich zum Auffinden der Resonanz der Suchautomatik des Gerätes. In einer Schleife wird im Abstand von einer Sekunde immer wieder vom Computer abgefragt, ob eine Resonanz gefunden wurde. Wird nach 100 Durchläufen keine Resonanz erkannt, bricht der Computer die Messung ab und gibt eine Fehlermeldung aus. Erfahrungsgemäß kann das Gerät überhaupt keine Resonanz finden, wenn es innerhalb der vorgegebenen Anzahl der Versuche erfolglos war. Ein Grund für die Erfolglosigkeit kann zum Beispiel ein zu großer Feldgradient am Ort der Probe sein.

Erkennt das Gerät die Resonanz, wird eine zweite Schleife gestartet. Der Schleifenindex erhöht sich um eins, wenn die darauffolgende Abfrage ebenfalls eine Resonanz meldet, sonst wird er zurückgesetzt. Die Schleife

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

ist notwendig, weil die Elektronik vereinzelt fälschlicherweise das Erkennen einer Resonanz anzeigt. Erst wenn fünfmal hintereinander eine Resonanz gemessen wurde, wird der gemessene Wert als richtig anerkannt. Das Programm liest ihn dann aus.

Das zugehörige Ablaufdiagramm ist in Abbildung 10.3 auf der Seite 108 dargestellt.

6.6 Datenauswertung

Die Auswertung der Meßdaten ist bisher nur für Messungen mit einem Spulensatz von vier Spulen vorgesehen, im Gegensatz zur Datenaufnahme, die für alle Spulensätze möglich ist.

6.6.1 Formen der Auswertung

Die Auswertung der Meßdaten der Magnetisierungskurve und der Feldkarte unterteilt sich in zwei Abschnitte.

Zum einen besteht sie aus einem numerischen Teil. Er berechnet direkt nach jeder Messung aus den Rohdaten die gewünschten physikalischen Größen. Die Auswertung dauert nur einige Sekunden. Die berechneten Daten werden in Dateien abgespeichert.

Darauf aufbauend können diese Daten zum anderen graphisch dargestellt werden. Die Graphiken werden so abgespeichert, daß sie sowohl auf einem Terminal betrachtet als auch über einen Drucker (auch in Farbe) ausgegeben werden können. Normalerweise wird die graphische Auswertung nicht ausgeführt, da sie nicht für jede Messung nötig ist. Außerdem benötigen die Bilddateien viel Speicherplatz und zu ihrer Erzeugung viel Rechenzeit. Für eine Graphik rechnet der Computer der Serie 330 mehrere Minuten. Der Benutzer muß diese Auswertung extra anfordern. Sollen doch einige Graphiken berechnet werden, so wäre bei deren Berechnung mit demselben Programm eine weitere Messung in dieser Zeit unmöglich. Daher werden die Befehle zur Graphikauswertung in Dateien, Shellscripts, abgespeichert. Durch ein Programm (igm.spooler) wird jeweils nur *eines* dieser Shellscripts parallel zum Meßprogramm ausgeführt, so daß die Messung dadurch nicht unterbrochen wird. Auf diese Weise wird nur ein geringer Teil der gesamten Rechenzeit auf die Graphikauswertung verwandt. Das Programm stellt selbständig fest, ob Daten gerade graphisch ausgewertet werden. Werden keine ausgewertet, startet es ein neues Shellscript für eine weitere Graphik. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis alle Skripts bearbeitet sind. Ein solches Programm bezeichnet man allgemein als Spooler. Es ist ebenfalls ein Shellscript. Der Spooler wird nur ein einziges Mal zu Beginn der benötigten Graphikauswertung gestartet. Er ist speicherresistent, das heißt er läuft auch dann weiter, wenn der Benutzer nicht mehr auf dem

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

Computer "eingelogg" ist. Dadurch wird sichergestellt, daß alle Auswertungen ausgeführt werden, selbst wenn sich der Benutzer vor Beendigung der Auswertung aus dem Rechner ausloggt.

Der Spooler ist so geschrieben, daß er auch auf anderen Rechnern gestartet werden kann. Dann übernimmt der andere Rechner die Graphikauswertung. Dadurch wird der für die Messungen zuständige Rechner entlastet. Im vorhandenen Meßaufbau wird normalerweise die Graphikauswertung vom Computer der Serie 855 übernommen. Dieser Rechner ist schneller als der Meßcomputer, so daß die Graphiken zudem früher bereit stehen.

6.6.2 Auswertung der Magnetisierungskurve

Für die Auswertung der Magnetisierungskurve werden die Meßdaten zusammen mit den Korrekturdaten aus den Rohdatendateien ausgelesen. Die nötigen Spulendaten werden entsprechend den verwendeten Spulenträgern aus der zugehörigen Datei entnommen. Das Auswerteprogramm kontrolliert durch Addition der beiden Spulenflips zu Beginn und am Ende der Messung für jede Spule die Unterschiede der beiden Feldwerte. Sie werden zusammen mit der Summe über alle, während der Stromänderung gemessenen Integrale, angezeigt. Ein Vergleich der Summen gibt Aufschluß über die Ungenauigkeit der Messung. Je enger die Werte aneinander liegen, desto genauer sind sie. Durch Summation der Hälfte des Meßwertes des Spulenflips mit allen Meßwerten bis zu einem bestimmten Strom I_m ergibt sich nach der Multiplikation mit den Korrekturfaktoren $korrr_k$ der Systemvoltmeter der magnetische Fluß $\Phi_k(I_m)$ bei diesem Strom.

$$\Phi_k(I_m) = \left(\frac{1}{2} \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt + \sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau(I_i)}^{\tau(I_{i+1})} U dt \right)_k korrr_k$$

Diese Werte werden für jede Spule k einzeln ausgerechnet.

Für die beiden inneren, im homogenen Feldbereich liegenden Spulen, berechnet das Programm getrennt die magnetische Induktionen in Abhängigkeit des Stromes I_m für alle m nach

$$B_k(I_m) = \frac{1}{N_k A_k} \Phi_k(I_m), \quad k = 1, 2$$

N ist die Windungszahl und A die Fläche der Spule. Der Index k bezeichnet die einzelnen Spulen¹.

Die integrale Feldlänge bestimmt das Programm ebenfalls aus dem ma-

¹siehe auch Kapitel 3.2 (Theorie der Meßmethoden; Die Feldmeßspule) ab Seite 18

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

gnetischen Fluß $\Phi_k(I_m)$ für alle m nach der Formel

$$\int_{\lambda} \vec{B}(I_m) d\vec{l} = \frac{1}{b} \sum_{k=0}^3 \frac{1}{N_k} \Phi_k(I_m) + \frac{1}{b} \sum_{k=0}^2 A_{F\ k,k+1} B_a(I_m)$$

$$a = 1 \quad \text{wenn} \quad k = 0; 1$$

$$a = 2 \quad \text{wenn} \quad k = 2; 3$$

Dabei ist $A_{F\ k,k+1}$ die Fehlfläche zwischen den Spulen k und $k+1$. Die Einheiten sind so gewählt, daß die magnetische Induktion in Tesla (T) und die integrale Feldlänge in Tesla $\times$ Meter (Tm) ausgegeben werden. Die berechneten Werte werden in einer Datei gespeichert.

Sollen die Daten graphisch ausgewertet werden, werden die Befehle für das Graphikprogramm in Dateien geschrieben. Nach deren Auswertung werden die beiden magnetischen Induktionen zusammen in einer Zeichnung in zwei verschiedenen Farben über dem Strom aufgetragen. In einem weiteren Bild wird die integrale Feldlänge ebenfalls über dem Strom aufgetragen. Alle Graphiken sind mit dem Magnetnamen, der Nummer der Messung, dem Meßdatum, den Namen der dargestellten Größen, den Achsenbezeichnungen und dem Meßort beschriftet. Auf jeden Meßpunkt zeigt ein Pfeil. Alle Punkte sind durch Linien miteinander verbunden. Sind in einem Bild zwei Kurven aufgetragen, erhalten beide Kurven zusätzlich zur farblichen Unterscheidung eine Legende.

6.6.3 Auswertung der Feldkarte

Analog der Auswertung der Magnetisierungskurve liest das Programm die zu Auswertung benötigten Daten ein. Die Abweichung der Summe über alle Meßwerte von Null wird für jede Spule angezeigt. Dadurch bekommt man auch bei dieser Meßart einen Anhaltspunkt für die Meßgenauigkeit.

Beginnend bei den Meßdaten des Spulenflips im Koordinatenursprung des Magneten werden die magnetischen Flüsse für die einzelnen Spulen k berechnet. Dazu summiert das Programm zum einen alle Meßdaten vom Ursprung bis zum Anfangspunkt der Messung auf, zum anderen alle Meßdaten bis zum Endpunkt der Messung. Der Meßwert des Spulenflips im Ursprung geht dabei je zur Hälfte in beide Summen mit ein.

Die Summe bis zu einem Ort x_m, y_m multipliziert mit den Korrekturfaktoren $korr_k$ der Systemvoltmeter ergibt den magnetischen Fluß $\Phi_k(x_m, y_m)$ an diesem Ort.

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

$$\begin{aligned}\Phi_k(x_m, y_m) &= \Phi_k(x_m, y_m; x_0, y_0) \\ &= \left(\frac{1}{2} \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt + \sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau(x_i, y_i)}^{\tau(x_{i+1}, y_{i+1})} U dt \right)_{\text{kor}_k}\end{aligned}$$

Für jede der beiden Spulen wird die magnetische Induktion in Abhängigkeit des Ortes ausgerechnet.

$$B_k(x_m, y_m) = \frac{1}{N_k A_k} \Phi_k(x_m, y_m) \quad k = 1, 2$$

Für einen Vergleich der durch die Ebene $z = 0$ aufgeteilten Seiten des Magneten wird neben der integralen Feldlänge auch die Feldlänge für beide Magnetseiten getrennt ausgerechnet. Die beiden Seiten sind bei der Messung mit den Spulen 0 und 1 auf der einen, 2 und 3 auf der anderen Seite bezeichnet. So gilt für die integrale Feldlänge der Hälften

$$\begin{aligned}\left(\int_{\frac{1}{2}\lambda} \vec{B}(x_m, y_m) d\vec{l}_{k,k+1} \right) &= \frac{1}{b} \left(\frac{1}{N_k} \Phi_k(x_m, y_m) + \frac{1}{N_{k+1}} \Phi_{k+1}(x_m, y_m) \right) \\ &+ \frac{1}{b} \left(A_{F k, k+1} + \frac{1}{2} A_{F 1,2} \right) B_a(x_m, y_m)\end{aligned}$$

mit $k = 0; 2$

$a = 1$ wenn $k = 0$

$a = 2$ wenn $k = 2$

Dabei ist $A_{F k, k+1}$ die Fehlfläche zwischen den Spulen k und $k + 1$. Die gesamte integrale Feldlänge ist die Summe der beiden Hälften.

Die effektive Länge wird ebenfalls für beide Hälften getrennt berechnet. Für sie gilt

$$\begin{aligned}l_{eff k, k+1}(x_m, y_m) &= \\ &\frac{1}{B_a(0,0)b} \left(\frac{1}{N_k} \Phi_k(x_m, y_m) + \frac{1}{N_{k+1}} \Phi_{k+1}(x_m, y_m) \right) \\ &+ \frac{1}{b} \left(A_{F k, k+1} + \frac{1}{2} A_{F 1,2} \right)\end{aligned}$$

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

mit $k = 0; 2$

$a = 1$ wenn $k = 0$

$a = 2$ wenn $k = 2$

Dabei ist m der Index über die nacheinander angefahrenen Orte und k der Index über die Spulen $0 \dots 3$.

Zusätzlich werden die Summe und die Differenz der Hälften gebildet. Die halbe Abweichung der Differenz von 0 gibt die Verschiebung der Ebene $z = 0$ des magnetischen zur Ebene $z = 0$ des mechanischen Koordinatensystems an². Alle diese Daten werden zusammen mit den Meßorten in einer Datei abgespeichert. In eine andere Datei werden die relativen Feldverteilungen

$$\frac{\Delta B}{B}$$

geschrieben. Sie werden für jede einzelne Spule, für jede einzelne Magnetseite und für den gesamten Magneten ausgerechnet. Der Wert $B(0, y_m)$, auf den das Feld bezogen wird, liegt bei $x = 0$ für jede zur Ebene $y = 0$ vermessene parallele Ebene. Berechnet werden für die einzelnen Spulen k

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta B}{B} \right)_k &= \frac{B_k(x_m, y_m) - B_k(0, y_m)}{B_k(0, y_m)} \\ &= \frac{\Phi_k(x_m, y_m)}{\Phi_k(0, y_m)} - 1 \end{aligned}$$

mit $k = 0 \dots 3$

Zur Berechnung der relativen Feldverteilung der beiden Hälften sowie des gesamten Magneten verwendet das Programm die vorher berechneten effektiven Längen. In ihnen sind die Fehlflächen schon berücksichtigt. Die konstanten Faktoren kürzen sich bei der Division weg. Dann gilt für beide Seiten

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta B}{B} \right)_{k,k+1} &= \frac{l_{eff\ k,k+1}(x_m, y_m)}{l_{eff\ k,k+1}(0, y_m)} - 1 \\ &\text{mit } k = 0; 2 \end{aligned}$$

und für die gesamte Länge

$$\left(\frac{\Delta B}{B} \right)_{ges} = \frac{l_{eff\ ges}(x_m, y_m)}{l_{eff\ ges}(0, y_m)} - 1$$

Die berechneten Größen für die magnetische Induktion werden in Tesla (T), die der integralen Feldlänge in Tesla $\times$ Meter (Tm) und die der effektiven Länge in Meter (m) angegeben. Die relativen Feldverteilungen sind dimensionslos.

²Siehe auch Kapitel 2.2.2 Multipole und Koordinatensysteme ab Seite 14

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

Die graphische Auswertung gleicht der der Magnetisierungskurve. Die Beschriftungen der Bilder sind ähnlich. Geändert sind die Achsenbezeichnungen, und anstelle des Meßortes wird der Meßstrom ausgedruckt. In einem Bild werden die berechneten Werte *einer* zur Ebene $y = 0$ parallelen Ebene dargestellt. Sie werden über den Meßorten der x -Achse aufgetragen. Die magnetischen Induktionen, die integralen Feldlängen und die effektiven Längen für beide Magnetseiten werden jeweils zusammen in einem Bild graphisch dargestellt. Außerdem berechnet das Programm für die gesamte integrale Feldlänge, die gesamte effektive Länge und für alle relativen Feldverteilungen die Graphiken. Es muß für jede der Ebenen zwölf Bilder erzeugen. Zusätzlich wird das Meßraster dargestellt.

6.6.4 Polynomfits für Multipolentwicklung

In dem Kapitel 2.2.2 zur Multipoldarstellung auf Seite 14 ist eine Potenzreihenentwicklung für die magnetische Feldstärke $H_y(x, y)$ angegeben. Darin sind die Faktoren c_n die Multipolkoeffizienten. Der Index y für die Feldkomponente wird im folgenden weggelassen.

$$H(x, y) = - \sum_{n=1}^{\infty} n c_n x^{n-1}$$

Für die magnetische Induktion gilt dann

$$B(x, y) = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} n c_n x^{n-1} = -\mu_0 \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) c_{n+1} x^n$$

Das Programm berechnet für $y = 0$ entlang der x -Achse für die Meßwerte $B_k(x, 0)$ beider inneren Spulen ($k = 1; 2$) die Koeffizienten a_n des Polynoms

$$B(x, y) = \sum_{n=0}^{n \leq 10} a_n x^n$$

Diese Programmteil ist mit einigen Änderungen aus dem Buch [Bevi 68] entnommen.

Der höchste berechenbare Polynomgrad ist $n = 10$.

Ein Koeffizientenvergleich von a_n und c_n der beiden Polynome ergibt für $n \leq 10$

$$-\mu_0 \sum_{n=0}^{n \leq 10} (n+1) c_{n+1} x^n = \sum_{n=0}^{n \leq 10} a_n x^n$$

$$\Rightarrow c_{n+1} = -\frac{1}{\mu_0(n+1)} a_n \quad \text{mit } 0 \leq n \leq 10$$

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

Die berechneten Koeffizienten a_n sind mit $-\frac{1}{\mu_0(n+1)}$ zu multiplizieren, um die Koeffizienten c_{n+1} zu erlangen.

Die a_n werden nach der "Methode der kleinsten Fehlerquadrate" berechnet. Dazu wird

$$\chi^2 \equiv \sum_i \left(y_i - \sum_n a_n x_i^n \right)^2$$

minimiert, das heißt die Ableitung gleich Null gesetzt. Der Summationsindex über alle Meßwert ist i . Daraus ergibt sich ein Gleichungssystem mit $n + 1$ Gleichungen für $n + 1$ Koeffizienten. Es wird mit Determinantenberechnungen gelöst.

In einigen Determinanten treten Elemente x^{2n} auf. Dies führt bei großen x -Werten mit einem hohen Polynomgrad n schnell zu sehr großen Zahlen. Diese treten in den Determinanten zusammen mit kleinen Zahlen auf. Da von Seiten des Computers die Zahlenwerte auf 16 Stellen begrenzt sind, ergeben sich bei deren Addition und Subtraktion Rechenungenauigkeiten. Um dem zu begegnen, werden die x -Werte so skaliert, daß sie möglichst nahe bei 1 liegen. Somit werden sie durch das Potenzieren nicht zu groß. Die Polynomkoeffizienten werden entsprechend wieder zurückskaliert.

$$\sum a_n x^n = \sum (s^n a_n) \left(\frac{x}{s} \right)^n$$

Dabei ist s der Skalierungsfaktor. In dem Programm kann die Ordnung des Polynoms, das an die Meßwerte angepaßt wird, angegeben werden. Wie gut Polynom und Meßwerte übereinstimmen, wird durch Berechnung von χ^2 ausgedrückt. Je näher χ^2 an Null liegt, desto besser ist die Anpassung.

Um den Grad des Polynoms mit der besten Anpassung zu ermitteln, wurde ein Programmteil geschrieben, der für alle n von 1 bis 10 die Polynom Anpassungen und χ^2 berechnet. Der Grad des Polynoms mit dem kleinsten χ^2 ergibt die beste Anpassung.

Zu beachten ist, daß der Wert der Koeffizienten vom Entwicklungsgrad des Polynoms abhängt. So sind in der Regel die Koeffizienten a_n unterschiedlich, wenn man die Meßwerte durch ein Polynom m -ten oder $m + 1$ -ten Grades annähert.

Zur Kontrolle der Anpassung werden die Meßwerte zusammen mit den Graphen des Annäherungspolynoms in einem Bild auf dem Terminal dargestellt.

Die Einheiten der Polynomkoeffizienten lauten

$$\begin{array}{ll} a_0 \Rightarrow \text{T} & c_1 \Rightarrow \frac{\text{A}}{\text{m}} \\ a_1 \Rightarrow \frac{\text{T}}{\text{m}} & c_2 \Rightarrow \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \end{array}$$

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

$$a_2 \Rightarrow \frac{\text{T}}{\text{m}^2} \quad c_3 \Rightarrow \frac{\text{A}}{\text{m}^3}$$

usw.

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

6.7 Datenverwaltung

Um die Vielzahl der Dateien verwalten zu können, müssen sie eindeutige Namen besitzen. Viele Dateien zusammen in einem Verzeichnis erschweren die Übersicht. Deshalb werden sie durch verschiedene Unterverzeichnisse geordnet.

Die Daten in den einzelnen Dateien haben eine vorgeschriebene Form, um sie möglichst übersichtlich darzustellen und, um den Programieraufwand für die Einleseroutinen gering zu halten.

Während des gesamten Meßvorgangs übernimmt das Programm alle Verwaltungsaufgaben. Möchte der Benutzer andere Daten angezeigt haben, als die zuletzt gemessenen, oder sollen Graphiken ausgedruckt werden, muß er dies extra anfordern. Dabei wird er durch Menüs geleitet.

6.7.1 Dateibaum

Im Betriebssystem UNIX ist es möglich, eine hierarchisch organisierte Dateienstruktur aufzubauen. Dazu verwendet man Verzeichnisse. Sie können sowohl Daten als auch weitere Verzeichnisse enthalten. Die Unterverzeichnisse können ebenfalls wieder Daten und Verzeichnisse enthalten. So entsteht eine baumartige Struktur. Jedem Benutzer des Rechners wird ein Verzeichnis zugeteilt, unter dem er nach Belieben weitere Verzeichnisse und Dateien anlegen darf.

Alle für die Messung benötigten Programmteile stehen in einem eigenen Verzeichnis. Mit Hilfe eines ebenfalls darin enthaltenen "makefile" werden die Programmteile einzeln in Maschinensprache übersetzt und anschließend zusammengebunden. Dieses nun vom Computer ausführbare Programm steht auch in diesem Verzeichnis.

Alle für den Meßablauf benötigten Dateien, wie die Spulenkalibrationsdaten, die Justierdaten und die Datei mit den Korrekturfaktoren stehen in einem gesonderten Verzeichnis. Dort sind auch für jeden Magneten eigene Unterverzeichnisse angelegt, die alle zu einem Magneten gehörenden Dateien enthalten. Sie sind nach den Magneten benannt, MD01 bis MD25. Zusätzlich gibt es noch ein Unterverzeichnis namens "korrekt" für alle jemals bestimmten Korrekturfaktoren der Systemvoltmeter.

In der Betriebssystemvariablen "MAGNET" ist der Weg zu dem Dateibaum abgespeichert. Dieser Weg wird zu Beginn des Programms abgefragt. Dateien werden entsprechend der Variablen aus dem angegebenen Dateibaum benutzt oder dort abgespeichert. Durch eine einfache Änderung der Variablen können alle Dateien auf einen anderen, gleichartigen Baum umgelenkt werden, auch wenn er sich auf einer anderen Festplatte befindet. Ein derartiger beschriebener Dateibaum kann mit dem Programm filesystem.c automatisch angelegt werden. Gestartet wird "filesystem" in

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

dem Verzeichnis, unter dem der Baum aufgebaut werden soll.

Der Dateibaum ist in der Abbildung 6.1 dargestellt.

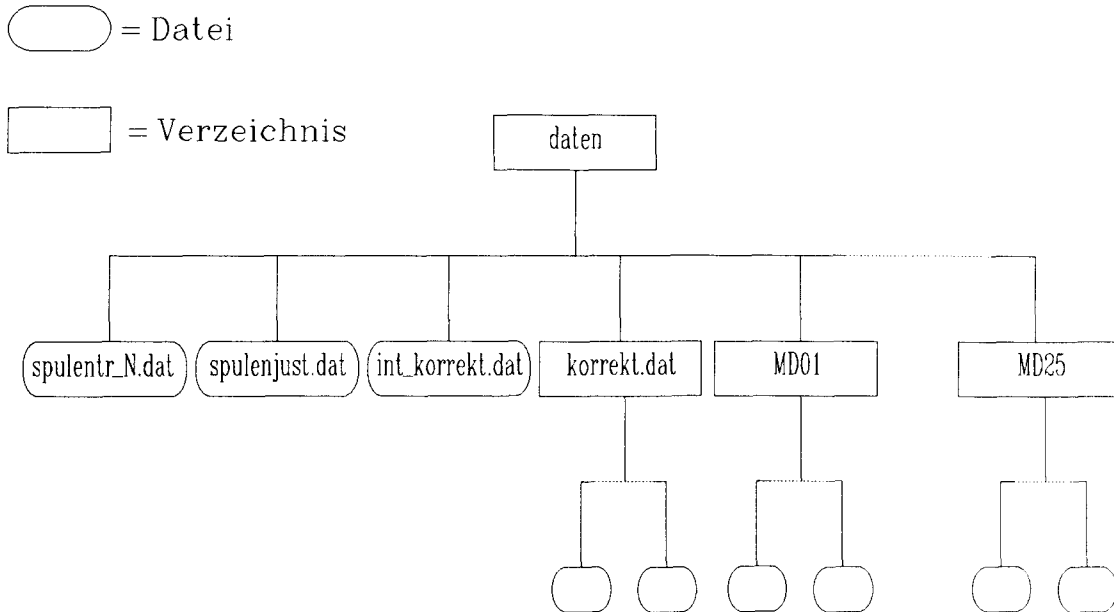


Abbildung 6.1: Darstellung des für das Meßprogramm benötigten Dateibaumes.

6.7.2 Namen der Meßdatendateien

Die Dateinamen müssen nicht nur eindeutig sein, sondern sollen auch einen Anhaltspunkt über ihren Inhalt geben.

Sie beginnen mit dem Magnetnamen, zu dem die Dateien gehören. Nach einem Unterstrich (_), wegen der besseren Lesbarkeit, folgt eine Bezeichnung der Art der enthaltenen Daten. Nach einem weiteren Unterstrich folgt eine zweistellige Zahl. Sie nummeriert die einzelnen Messungen für jede der beiden Meßarten getrennt durch. Die Dateien mit den ausgewerteten Daten besitzen dieselbe Nummer wie die zugehörige Rohdatendatei. Für die Datenart sind folgende Bezeichnungen festgelegt

- *ddl* für die Rohdaten der Feldkartenmessung
- *DBB* für relative Feldverteilungen, berechnet aus den Rohdaten der Feldkarte
- *BDL* für alle restlichen aus den Rohdaten der Feldkarte berechneten Größen
- *bista* für die Rohdaten aus der Magnetisierungskurve

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

- *BISTA* für die berechneten Größen aus den Rohdaten der Magnetisierungskurve

Dabei soll *BDL* an die wichtigste Größe aus der Messung der Feldkarte, das $\int B \, dl$ erinnern, *DBB* an die relative Feldverteilung $\frac{\Delta B}{B}$ und *BISTA* an die statische Messung der Magnetisierungskurve $B(I)$.

Die Namensgebung, einschließlich der Bestimmung der Verzeichnisse, in die die Dateien geschrieben werden, ermittelt der Programmteil `filename.c` automatisch. Durch ein Menü (Indexmenü) gesteuert, kann sich der Programmbenutzer einen Überblick über die angelegten Dateien verschaffen. Er kann sich auf Wunsch alle Dateinamen listen lassen. Außerdem kann er sich aus den einzelnen Dateien Teile anzeigen lassen.

Die Graphikdateinamen für die Darstellung auf dem Bildschirm beginnen mit einem *G* (*G* für Graphik), die für die Darstellung auf den Druckern mit einem *H* (*H* für Hardcopy). Die folgenden vier Ziffern geben die Nummer des Magneten und die fortlaufende Nummerierung der Rohdatendateien an. Zwei Buchstaben geben die Art der ausgewerteten Daten an. (*MR* $\hat{=}$ Meßraster, *AF* $\hat{=}$ absolute Feldwerte, *BL* $\hat{=}$ Ablenkstärke, *EL* $\hat{=}$ effektive Länge, *RF* $\hat{=}$ relative Feldverteilung, *BI* $\hat{=}$ magnetische Erregungskurve) Sind von einer Art mehrere Daten vorhanden, werden sie durchnummeriert. Sind bei der Feldkartenmessung mehrere *y* Ebenen ausgemessen worden, wird für die Mittelebene eine 0 angehängt. Die Graphikdateien für die anderen Ebenen werden je nach *y*-Richtung mit positiven oder negativen Zahlen durchnummeriert. Die Namensgebung für alle Graphikdateien wird von den Programmen zur graphischen Auswertung (`igm_bista.c` und `igm_bdl.c`) mit übernommen.

Alle zu den Magneten gehörenden Daten, die Meßdaten, die ausgewerteten Daten sowie die Graphiken können auf dem Terminal oder auf Druckern ausgegeben werden. Die dazugehörige Benutzerführung erfolgt ebenfalls über Menüs. Der Name dieses Programmteils lautet `druckmenue.c`.

6.7.3 Aufbau der Dateien

Alle Rohdatendateien besitzen zu Anfang einige Zeilen, die als Datenkopf bezeichnet werden. Zum einen sind in ihnen der Magnetname, die Dicke der Polschuhkorrekturplatten, das Meßdatum, die Meßspulenbezeichnung und die Anzahl der abgespeicherten Meßwerte aufgeführt. Durch die Angabe der Anzahl der Meßwerte zu Beginn der Datei wird erreicht, daß beim Auslesen passend Speicherplatz im Rechner bereitgehalten wird. Außerdem hat der Datenkopf Platz für einen Kommentar, in dem zum Beispiel das Ergebnis einer Feldmessung mit der Kernspinresonanzsonde abgespeichert werden kann. Ein zweiter Teil des Datenkopfes enthält meßartspezifische Daten. Für die Magnetisierungskurve wird der Ort der Messung angegeben,

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

für die Feldkarte das Meßraster und der Strom. In einem dritten Teil des Datenkopfes werden die Spalten, unter denen die Meßwerte angeordnet werden sollen, beschriftet.

Im Anschluß an den Datenkopf folgen die Meßwerte selbst. Alle Zeilen haben den gleichen systematischen Aufbau.

Für die Messung der Feldkarte enthalten sie Angaben über die beiden Koordinatenpaare der x, y Ebene, bei der die Integration beginnt und endet. Dahinter stehen die Integrale aus den Spulen. Sind die beiden Koordinatenangaben in einer Zeile gleich, so enthält diese Zeile die Meßwerte des Spulenflips.

Bei den Meßwerten der Magnetisierungskurve sind anstelle der Koordinatenpaare Anfangs- und Endstrom einer Integration aufgeführt. Zusätzlich zu den Integralen aus den Spulen ist das Integral aus der Korrekturspule ums Magnetjoch mit aufgelistet.

Bei beiden Messungen entspricht die Anzahl der aufgeführten Spulenintegrale einer Zeile der Anzahl der verwendeten Spulen.

Im Anschluß an die Meßwerte sind bei beiden Meßarten die Korrekturfaktoren der Systemvoltmeter, die Kühlwassertemperaturen und die Spulenkalibrationsdaten abgespeichert. Alle für eine Auswertung notwendigen Daten sind also in jeder Datei enthalten.

Die Dateien mit den ausgewerteten Daten besitzen eine vergleichbare Struktur. Ihr Datenkopf ist ebenfalls dreigeteilt. Die einzelnen Teile entsprechen denen der jeweiligen Rohdatendateien, sind aber an die etwas anderen Erfordernisse angepaßt. Alle weiteren noch in den Dateien enthaltenen Daten sind im Kapitel 6.6 Datenauswertung beschrieben.

Die Graphikdateien sind die Ausgabedateien aus dem Programm "igm". Sie sind mit einer Steuersequenz für das Terminal oder den Drucker versehen. Auf sie kann nach Erstellung kein Einfluß mehr genommen werden.

Die Spulenkalibrationsdatei besteht aus drei ineinander verschachtelten Ebenen. Die obere enthält alle für den Träger wichtigen Daten. Für jeden Spulensatz bildet sie wieder eine eigene Ebene. Diese enthält alle Daten, die zu einem Spulensatz gehören. Innerhalb dieser Ebene wird eine weitere Unterebene für jede einzelne Spule erstellt. Hier sind die für die Spulen und Fehlflächen relevanten Größen abgespeichert. Diese Struktur spiegelt die Abhängigkeit aller Spulengrößen wider. Die Daten sind dadurch immer richtig zueinander geordnet.

6.7.4 Datensicherung

Von einigen Festplatten des Rechners der Serie 855 wird täglich ein "inkrementales Backup" gemacht. Dies bedeutet, daß durch ein Programm täglich von den Dateien, die seit der letzten Sicherungskopie verändert wurden oder die neu hinzugekommen sind, eine Sicherungskopie gemacht wird. Zusätz-

KAPITEL 6. PROGRAMMIERUNG DER FELDMESSUNGEN

lich wird in regelmäßigen Abständen von dem ganzen Dateiensystem einiger Festplatten eine Sicherungskopie gemacht. Daher werden alle Daten, für die das beschriebene Sicherungssystem existiert, auf eine solche Festplatte geschrieben. Außerdem wird, sobald ein Magnet fertig vermessen ist, eine Kopie seiner gesamten Daten auf einer Kassette hinterlegt.

Kapitel 7

Meßgenauigkeit

Dieses Kapitel besteht aus drei Teilbereichen. Im ersten Teil werden die geforderten Meßtoleranzen angegeben. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der maximal erreichbaren Auflösung. Im dritten Teil werden dann die einzelnen Fehlermöglichkeiten aufgezeigt und ihre Folgen auf die berechneten Werte diskutiert.

Die Fehler werden, wie in der Fachliteratur üblich, mit einem Δ bezeichnet.

7.1 Toleranzvorgaben

Aus Strahlspurberechnungen wird eine Identität bezüglich $\int B \, dl$ entlang der Strahlachse von $\pm 2 \times 10^{-4}$ für alle 24 Ablenkmagnete untereinander gefordert.

Der nutzbare Feldbereich entlang der x -Achse soll in $\frac{\Delta B}{B}$ auf $\pm 10^{-4}$ konstant sein. Der nutzbare Feldbereich liegt bei der Injektionsenergie bei $-100 \text{ mm} \leq x \leq 100 \text{ mm}$ und bei der Maximalenergie im ungekühlten Phasenraum bei $-60 \text{ mm} \leq x \leq 60 \text{ mm}$. Wegen der Sagitta der gekrümmten Teilchenbahn im geraden Magneten sind diese Feldbereiche jeweils 60 mm größer als sie für einen gekrümmten Magneten wären.

7.2 Auflösung

Die maximale Auflösung ist je nach Art der Messung unterschiedlich und bezieht sich auch auf verschiedene Größen. Die Auflösung in der Feldkarte gibt die maximal noch auflösbaren Felder an verschiedenen Orten an. In der Erregungskurve dokumentiert die Auflösung, welche zeitlichen Feldänderungen noch gemessen werden können. Die Auflösung des Spulenflips zeigt die untere Grenze des noch meßbaren Feldes auf.

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

7.2.1 Auflösung in der Feldkarte beim Verschieben der Spulen

Die Auflösung der Meßanordnung in der Feldkarte bezeichnet man als die kleinste noch meßbare Feldänderung zwischen zwei Rasterpunkten. Sie ist gegeben durch die minimale Eingangsspannung U_{ind} und der Verfahrgeschwindigkeit v der Tische. Für die induzierte Spannung gilt

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Sind der Einheitsvektor der Flächennormalen $\vec{e}_n$ und $\vec{B}$ parallel, gilt mit $\Phi = B A N$ für die im homogenen Feldbereich liegenden Spulen

$$U_{ind} = -AN \frac{dB}{dt}.$$

Da die magnetische Induktion $B(x(t))$ vom Ort x abhängt und dieser Ort eine Funktion der Zeit t ist, schreibt man für die induzierte Spannung

$$U_{ind} = -AN \frac{dB}{dx} \frac{dx}{dt}.$$

Die beiden Ableitungen haben eine anschauliche Bedeutung. $\frac{dB}{dx}$ ist die Änderung des Feldes, das heißt, der Feldgradient in x -Richtung. $\frac{dx}{dt}$ wird die Fahrgeschwindigkeit v in Richtung der x -Komponente des Gradienten genannt. Der noch auflösbare Feldgradient ist durch die minimale Eingangsspannung $U_{ind\ min}$ des Integrators und durch die Geschwindigkeit v gegeben

$$\frac{dB}{dx} = -\frac{U_{ind\ min}}{ANv}.$$

Da die Tische für jeden Rasterpunkt halten und wieder anfahren, ist wegen der minimalen Eingangsspannung in der unmittelbaren Umgebung dieser Punkte keine Messung möglich. Die Auflösung nimmt aber mit dem Abstand vom einem Punkt bis zur Mitte zwischen zwei Punkten zu.

Ein Zahlenbeispiel soll einen Anhalt für die mögliche Auflösung geben. Die minimale Eingangsspannung $U_{ind\ min}$ der Systemvoltmeter ist im empfindlichsten Meßbereich mit 10^{-7} V spezifiziert. Die Windungszahl N der verwendeten Spulen hat den Wert 100 und die Fläche A einer Windung ist $3,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

Wird der Rasterabstand bezüglich der x -Koordinate auf 5 mm festgelegt, so beträgt die erreichte Fahrgeschwindigkeit in der Mitte zwischen zwei Rasterpunkten mit den in der Tabelle 10.5 auf Seite 113 angegebenen Parametereinstellungen der Tischsteuerung $2250 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Dann erreichen die Tische nach $\frac{1}{9}$ mm eine Geschwindigkeit v von $100 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$. Ab dort kann ein

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

größerer Gradient als

$$\frac{dB}{dx} = 2 \times 10^{-4} \frac{\text{T}}{\text{m}}$$

aufgelöst werden. Über den betrachteten Bereich von ± 100 mm erhält man bei einem mittlerem Feld von 0,8 T eine Auflösung in $\frac{\Delta B}{B}$ von 5×10^{-5} .

Bei größeren Feldern und größeren Geschwindigkeiten wird die relative Auflösung besser.

Für die Spulen im Streufeldbereich ergibt sich eine andere maximale Auflösung. Zu ihrer Berechnung wird für die Fläche der Spule die wirk-same Fläche angegeben. Die wirksame Fläche ist die Fläche, die innerhalb des durch die effektive Länge gegebenen Feldbereiches liegt. Das Flächen-verhältnis für den wirksamen Bereich der Streufeldspulen zu den inneren Spulen beträgt etwa 1 : 2,5. In den Streufeldspulen ist die Auflösung um den Faktor 2,5 schlechter.

7.2.2 Auflösung in der Erregungskurve

Die Überlegungen zur Auflösung in der Erregungskurve sind die gleichen wie im vorherigen Abschnitt. Der Unterschied liegt darin, daß die Induktion $B(I(t), \dot{I}(t))$ von der Änderung des Stromes I und dieser wiederum von der Zeit t abhängt. Daneben gibt es noch Wirbelströme, die ebenfalls die magnetische Induktion beeinflussen. Ihre Größe wird bestimmt durch die Änderung des Stromes in der Zeit ($\dot{I}(t)$).

Als maximaler mittlerer Induktionsanstieg ist

$$\frac{dB}{dt} = 1 \frac{\text{T}}{\text{s}}$$

in der Spezifikation angegeben [Hardt 88]. Mit

$$U_{ind} = -AN \frac{dB}{dt}$$

ergibt dieser mittlere Anstieg in den inneren Spulen eine Spannung von 0,32 V. Auch wenn $\frac{dB}{dt}$ in der Nähe des Anfangsstromes und des Endstromes einer jeden Stromstufe nicht ganz so groß ist wie im Mittel, so wird die minimale Eingangsspannung weit überschritten, da der maximal noch auflösbare Feldanstieg bei $3 \times 10^{-7} \frac{\text{T}}{\text{s}}$ liegt. Für die Messung der Erregungskurve ist die Auflösung ausreichend.

Man muß im Gegenteil darauf achten, daß der Anstieg nur so groß gewählt wird, damit nicht eine Spannung von 0,2 V überschritten wird. Oberhalb von 0,2 V schaltet der Spannungsintegrator in den nächst höheren Meßbereich. Dies ist mit Genauigkeitsverlusten verbunden.

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

7.2.3 Auflösung im Spulenflip

Beim Spulenflip werden die Spulen, wie im Abschnitt 4.3 auf Seite 27 beschrieben, aus dem Magneten herausgefahren. Dann hängt die induzierte Spannung, wie bei der Feldmessung durch Verschieben der Spulen, von den örtlich unterschiedlichen Feldern und der Verfahrgeschwindigkeit ab. Da der Fahrweg wesentlich länger ist als die Meßrasterabstände, wird eine größere Geschwindigkeit erreicht. Somit ist die Auflösung mindestens so gut wie beim Abfahren des Meßrasters.

Sind die Spulen weiter als 350 mm vom Koordinatenursprung des Magneten in x -Richtung entfernt, so ist das Feld auf 10^{-2} des inneren Feldes abgesunken. Dann ist der Beitrag durch die Drehung der Spule nur 10^{-2} des gesamten Meßwertes. Somit spielt er für die Auflösung der Feldbestimmung keine Rolle.

Das minimal auflösbare Feld beträgt mit den Daten aus der Verschiebung der Spulen 7×10^{-5} T.

Würde die Spule in Inneren des Magneten gedreht, ergibt sich trotz manueller und damit nicht reproduzierbarer Messung folgende großzügige Abschätzung.

Wird die Spule innerhalb von 10 Sekunden so gedreht, daß die Flußänderung etwa gleich bleibt, so muß das minimale Spannungszeitintegral einen Wert von 10^{-6} Vs erreichen, um immer eine Eingangsspannung von 10^{-7} V zu haben. An der Stelle des Spulenflips wird ein minimales Feld vom $6,3 \times 10^{-6}$ T aufgelöst.

7.2.4 Zahlenbeispiele der Auflösung

Hier sind nochmals die Zahlenbeispiele der berechneten Auflösungen der Übersichtlichkeit wegen zusammengefaßt:

- $\frac{dB}{dx} : 2 \times 10^{-4} \frac{T}{m}$ ab $v = 100 \frac{mm}{min}$
- $\frac{\Delta B}{B} : 5 \times 10^{-5}$ bei 0,8 T über dem nutzbaren Felbereich
- $\frac{dB}{dt} : 3 \times 10^{-7} \frac{T}{s}$
- $B : 6,3 \times 10^{-6}$ T, für einen Spulenflip innerhalb des Magneten;
besser als 7×10^{-5} T, für einen Spulenflip außerhalb des Magneten

7.3 Fehlerbetrachtungen

7.3.1 Fehlermöglichkeiten

In diesem Teilabschnitt werden die einzelnen Fehlermöglichkeiten voneinander isoliert betrachtet und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Messung

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

diskutiert.

- **Positionierfehler der Zweiachstische**

Bei der Messung der Feldkarte unterbrechen die Tische ihre Bewegung an den Rasterpunkten. Wie in Abschnitt 7.2.1 über die Auflösung bereits beschrieben, ist ihre Geschwindigkeit im Bereich von etwa einem $\frac{1}{10}$ mm vor und nach den Rasterpunkten so klein, daß die induzierte Spannung kleiner als die minimale Eingangsspannung der Systemvoltmeter ist. Dort wird dann, wenn der Feldgradient so klein wie angenommen ist, nichts gemessen. Die absolute Positioniergenauigkeit von einigen hundertstel mm ist um eine Größenordnung besser. Somit braucht diese Ungenauigkeit nicht berücksichtigt zu werden.

- **Kippung der Spule**

Ist die Normale der Spulenfläche $\vec{e}_n$ um einen Winkel α gegenüber der y -Achse gekippt, so verringert sich die für die Messung wirksame Spulenbreite. Für sie gilt

$$b_{\text{wirksam}} = b \times \cos(\alpha)$$

Für die relative Breitenänderung gilt:

$$\frac{b_{\text{wirksam}} - b}{b} = 1 - \cos(\alpha)$$

Bei einem Winkel von $0,26^\circ$ hat das einen Einfluß von 1×10^{-5} auf die wirksame Breite der Spule. Die Halterung des Spulenträgers ist so genau gefertigt, daß die Kippung geringer als $0,26^\circ$ ist, was bei einer Auflagefläche des Spulenträgers von 44 mm eine Fertigungsgenauigkeit von $\pm 0,1$ mm ausmacht.

- **Flächeneinschluß im Anschlußkabel der Spulen**

Sind zwei Kabel eng umeinander verdreht so, ist der Verlauf eines Kabels nach einer Projektion auf eine Ebene durch eine Sinuskurve beschreibbar. Die einzelnen zwischen den beiden Kabeln eingeschlossenen Flächen werden bestimmt durch die Dicke ihrer Isolierung und die Anzahl der Verdrehungen pro Längeneinheit. Die eingeschlossene Fläche ist das Doppelte des Integrals über den Sinus über einer halben Periode (Abbildung 7.1). Die Periodenlänge ist durch die Anzahl der Verdrehungen pro Längeneinheit gegeben. Die Amplitude des Sinus wird durch die Isolationsstärke des Kabels bestimmt. Dann gilt für die Fläche F mit einer Isolationsstärke von 0,5 mm und einer halben Verdrehung pro 5 mm

$$F = 2 \times 0,5 \text{ mm} \int_{0 \text{ mm}}^{5 \text{ mm}} \sin\left(\frac{\pi x}{5 \text{ mm}}\right) dx = 3,2 \text{ mm}^2$$

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

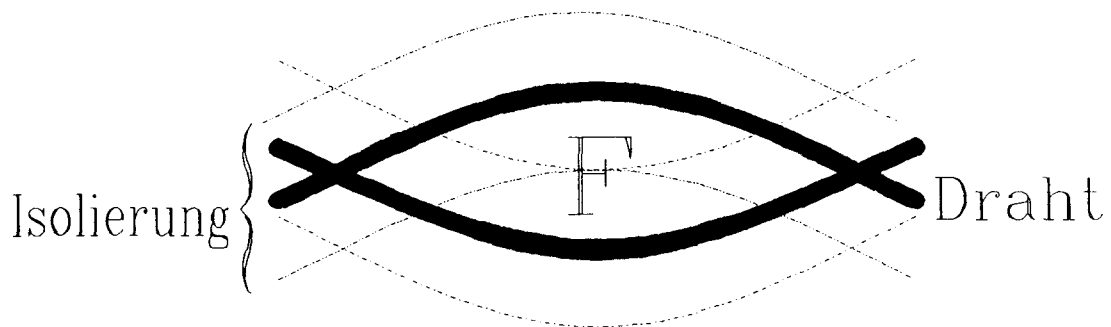


Abbildung 7.1: Eingeschlossene Fläche F zwischen zwei umeinander verdrehten Kabeln.

Da zwei benachbarte Flächen eine antiparallele Flächenorientierung haben, heben sich gerade alle Signale in einem für beide Flächen gleichen Magnetfeld auf. Führt aber ein solches verdrehtes Kabel aus einem Magnetfeld in einen feldfreien Raum, so nimmt für jede Fläche entlang des Kabels von innen nach außen, das Magnetfeld ab. Damit kompensieren sich zwei benachbarte Flächen nicht mehr vollständig. Der ungünstigste Fall ist der, daß von einer nicht kompensierten Fläche zur anderen das gesamte Feld abgefallen ist.

Nur die inneren Spulen eines Spulensatzes haben eine solche verdrehte Zuleitung, die durch das zu messende Magnetfeld geht. Auf deren Fläche bezogen, ergibt sich durch die Kabel eine maximale Flächenunsicherheit von 1×10^{-5} .

- **Ungenauigkeit des Korrekturfaktors**

Die relative und die absolute Ungenauigkeit für die Korrekturfaktoren der Integralwerte ist im Abschnitt 5.4.4 "Fehlerbetrachtung der Korrekturen" auf Seite 51 mit $7,5 \times 10^{-6}$ angegeben.

- **Genauigkeit der Spulengeometrie**

Die Kenntnis der Ungenauigkeiten der Spulensatzbreite, der Spulenflächen und der Fehlflächen ist für eine vergleichende Messung der Magnete untereinander solange nicht erforderlich, wie die Magnete mit demselben Spulensatz vermessen werden. Erst wenn verschiedenen Spulensätzen verwendet werden oder die absoluten Werte der

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

Magnete gemessen werden sollen, muß man die Ungenauigkeiten kennen.

Die Spulensatzbreite ist auf $\pm 0,005$ mm genau bekannt.

Bei der Spulenkalkulation wurde die Fläche der inneren Spulen mit einer relativen Genauigkeit von $\pm 2 \times 10^{-4}$ bestimmt.

In die Bestimmung der Ungenauigkeiten der Fehlflächen gehen die Ungenauigkeiten der Spulensatzbreite und der Abstände der Halbkreismittelpunkte der Spulenenden mit ein. Letztere haben eine Fertigungsunsicherheit von $\frac{1}{100}$ mm. Die Unsicherheit der Fehlflächen ist $\frac{1}{100}$ mm². Der Flächenfehler, hat bezogen auf die inneren Meßspulen, mit 3×10^{-7} der Fläche eine vernachlässigbare Größe.

- **Fehler durch Stromschwankungen**

Die relativen Schwankungen der Stromversorgung der Magnete sind mit 10^{-5} angegeben.

Sind die Kompensationsspulen nur auf 10^{-2} der Fläche der Spulen abgeglichen, so kompensieren sie die Schwankungen auch um 10^{-2} . Das bedeutet, daß die mit angeschlossenen Kompensationsspulen in die Messung eingehenden Schwankungen um den Faktor 10^{-2} kleiner werden. Die Schwankungen sind mit 10^{-7} vernachlässigbar.

- **Wärmeausdehnung**

Für den magnetostatischen Fall gilt nach den Maxwellschen Gesetzen

$$NI = \oint_{\sigma} \vec{H} d\vec{s}.$$

N ist die Windungszahl der Erregerspule, I der Strom durch diese Spule, $\vec{H}$ das Magnetfeld und $d\vec{s}$ ein Stück des geschlossenen Weges entlang der Feldlinie σ . Wird der Integrationsweg, beginnend von der unteren Polschuhfläche durchs Rückflußjoch bis zur oberen Polschuhfläche, und von dort aus durch den Polspalt an den Anfang zurück gewählt, so gilt für die magnetische Induktion B

$$\mu_0 NI = \left(h + \frac{\lambda}{\mu_r}\right) B,$$

wobei h die Polspalthöhe und λ die Weglänge einer Feldlinie im Eisenjoch mit der Permeabilität μ_r . Ist μ_r groß gegen 1, was für Eisen zutrifft, so kann man $\frac{\lambda}{\mu_r}$ gegenüber h vernachlässigen. Es gilt

$$B \propto \frac{1}{h}.$$

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

Die Wärmeausdehnung macht sich im Rückflußloch für die Polspalthöhe h nur auf der Länge der Höhe h bemerkbar. Bei einem Ausdehnungskoeffizienten von $1,15 \times 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ und einer Temperaturänderung von $\Delta T = 1^\circ$, wird die relative magnetische Induktion um diesen Faktor kleiner. Daher ist eine solche Temperatúrausdehnung vernachlässigbar.

Die absolute Ausdehnung des Magneten in Strahlrichtung liegt bei $\Delta T = 1^\circ$ und einer Eisenlänge von 1,76 m laut $l = l_0(1 + \alpha\vartheta)$ bei 2×10^{-2} mm.

In erster Näherung ist die Änderung der effektiven Länge gleich der Längenausdehnung. Steigt die Temperatur, wird für $\int_{-\infty}^{\infty} B \, dl = B_0 l_{eff}$ die effektive Länge größer und B_0 kleiner. Das bedeutet, daß die Längenausdehnung und die Vergrößerung der Polspalthöhe sich in der für den Teilchenstrahl relevanten Ablenkstärke teilweise kompensieren.

• Ungenauigkeit der Spannungszeitintegration

Im Handbuch zu den Systemvoltmetern sind keinerlei Spezifikationen bezüglich der Fehlergrenzen der Spannungszeitintegrationen angegeben. Folgende Überlegungen geben aber eine Abschätzung der Ungenauigkeiten.

Die Ungenauigkeiten setzen sich aus zwei Teilen zusammen, zum einen aus der Unbestimmtheit der Quarzfrequenzen und zum anderen aus den Fehlergrenzen der Spannungsmessungen. Der Teil der Fehlerbestimmungen bezüglich der Korrekturfaktoren wurde schon beschrieben. Für eine Spannungsmessung ist im Meßbereich bis 0,2 V bei einer maximalen Temperaturschwankung von $\pm 1^\circ$ eine Ungenauigkeit ΔU von

$$\Delta U = \pm(7 \times 10^{-6} U + 9 \times 10^{-7} \text{V})$$

angegeben.

Da das Systemvoltmeter intern eine Spannung mißt, indem es die zu messende Spannung integriert und anschließend durch die Meßzeit dividiert, kann die Genauigkeitsangabe der Spannungsmessung auf die Spannungszeitintegration übertragen werden. Es gilt dann

$$\Delta \int U \, dt = \pm \left(7 \times 10^{-6} \int U \, dt + 9 \times 10^{-7} \text{Vs} \right),$$

wenn der Fehler in der Zeitbestimmung durch den Korrekturfaktor Δ_{kor} berücksichtigt wird.

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

Nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet sich die gesamte Ungenauigkeit einer Spannungszeitintegration nach (der Index k für die einzelnen Geräte ist hier weggelassen)

$$\Delta \left(korr \int U dt \right) = \sqrt{(\Delta korr)^2 \left(\int U dt \right)^2 + \left(\Delta \int U dt \right)^2 (korr)^2}$$

mit

$$\Delta korr = 7,5 \times 10^{-6}$$

$$korr \approx 1$$

$$\Delta \int U dt = 7 \times 10^{-6} \int U dt + 9 \times 10^{-7} \text{ Vs}$$

Die Werte in $\int U dt$ sind unterschiedlich groß. Für einen Spulenflip in einem mittleren Feld von 0,8 T erhält man etwa 0,5 Vs. Für eine Verschiebung der Spulen um 10 mm bei einem Feldgradienten von $10^{-3} \frac{\text{T}}{\text{m}}$ ergibt das Integral etwa $2 \times 10^{-6} \text{ Vs}$.

Die Abhängigkeit des Fehlers vom Meßwert ist in der Abbildung 7.2 dargestellt.

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

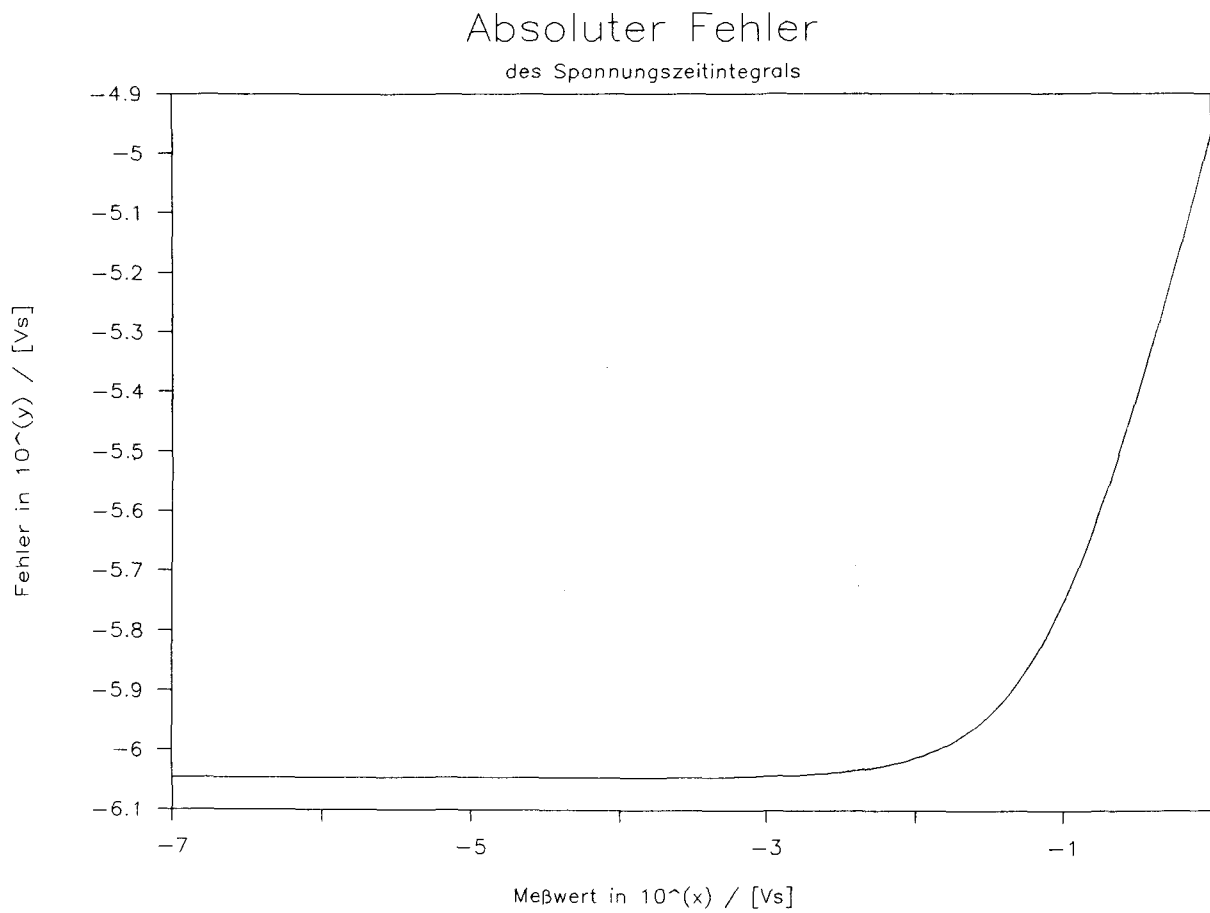


Abbildung 7.2: Meßungenauigkeit der Spannungszeitintegration in Abhängigkeit der Meßwerte.

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

7.3.2 Fehler im magnetischen Fluß

Sowohl für die Auswertung der Magnetisierungskurve als auch der Feldkarte wird der magnetische Fluß für jeden Stromwert und jeden Ort berechnet. Er setzt sich jeweils aus der Hälfte des Spulenflips und aus der Summe der Einzelintegrale bis zum betrachteten Stromwert oder bis zum betrachteten Ort zusammen. Dies ist in den Kapiteln 6.6.2 und 6.6.3 auf den Seiten 64 und 65 beschrieben.

$$\Phi_k = \left(korr_k \frac{1}{2} \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt + korr_k \sum_{i=0}^{m-1} \int_{\tau} U dt \right)_k$$

Die Grenzen der Einzelintegrale $\int_{\tau} U dt$ sind für die Magnetisierungskurve die Ströme I_i und für die Feldkarte die Orte $(x_i; y_i)$.

Für die Unbestimmtheit von $\Delta\Phi$ des magnetischen Flusses gilt nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta\Phi_k = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\Delta \left(korr_k \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt \right) \right)^2 + \sum_{i=0}^{m-1} \left(\Delta \left(korr_k \int_{\tau} U dt \right) \right)^2}$$

Haben die Einzelintegrale in der Messung der Magnetisierungskurve etwa die gleichen Größen, haben deren Fehler ebenfalls die gleichen Werte. Das gilt annähernd im noch ungesättigten Feldbereich des Eisens, wenn die Differenzen der Ströme zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen gleich sind.

Für die Aufnahme der Feldkarte sind wegen der zu erwartenden Feldhomogenität die Integrale sehr klein. Auf Grund des konstanten Fehleranteils der Integrationsmessung (im vorherigen Abschnitt beschrieben) sind die Meßunsicherten fast alle gleich.

Daher kann man bei beiden Meßarten anstelle der Summe über die Einzelfehler die Ungenauigkeit mit der Anzahl n der zur Summe beitragenden Integrale multiplizieren.

Die Schwankungen der Meßwerte sind statistisch verteilt. Der Fehler in der vormaligen Summe ist dann mit $\frac{1}{\sqrt{n}}$ zu multiplizieren.

Für die Meßungenauigkeit gilt

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_k &= \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\Delta \left(korr_k \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt \right) \right)^2 + \frac{1}{n} n \left(\Delta \left(korr_k \int_{\tau} U dt \right) \right)^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{4} \left(\Delta \left(korr_k \int_{\tau(\vec{e}_n)}^{\tau(-\vec{e}_n)} U dt \right) \right)^2 + \left(\Delta \left(korr_k \int_{\tau} U dt \right) \right)^2}. \end{aligned}$$

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

Die Abbildung 7.3 zeigt den Fehler des relativen magnetischen Flusses in der Feldkarte bei der als Beispiel die magnetische Flußdifferenz zwischen zwei 10 mm weit entfernten Rasterpunkten die geforderte Feldauflösung von $\frac{\Delta B}{B} = \pm 2 \times 10^{-4}$ auf einer Länge von ± 100 mm zugrundegelegt wird.

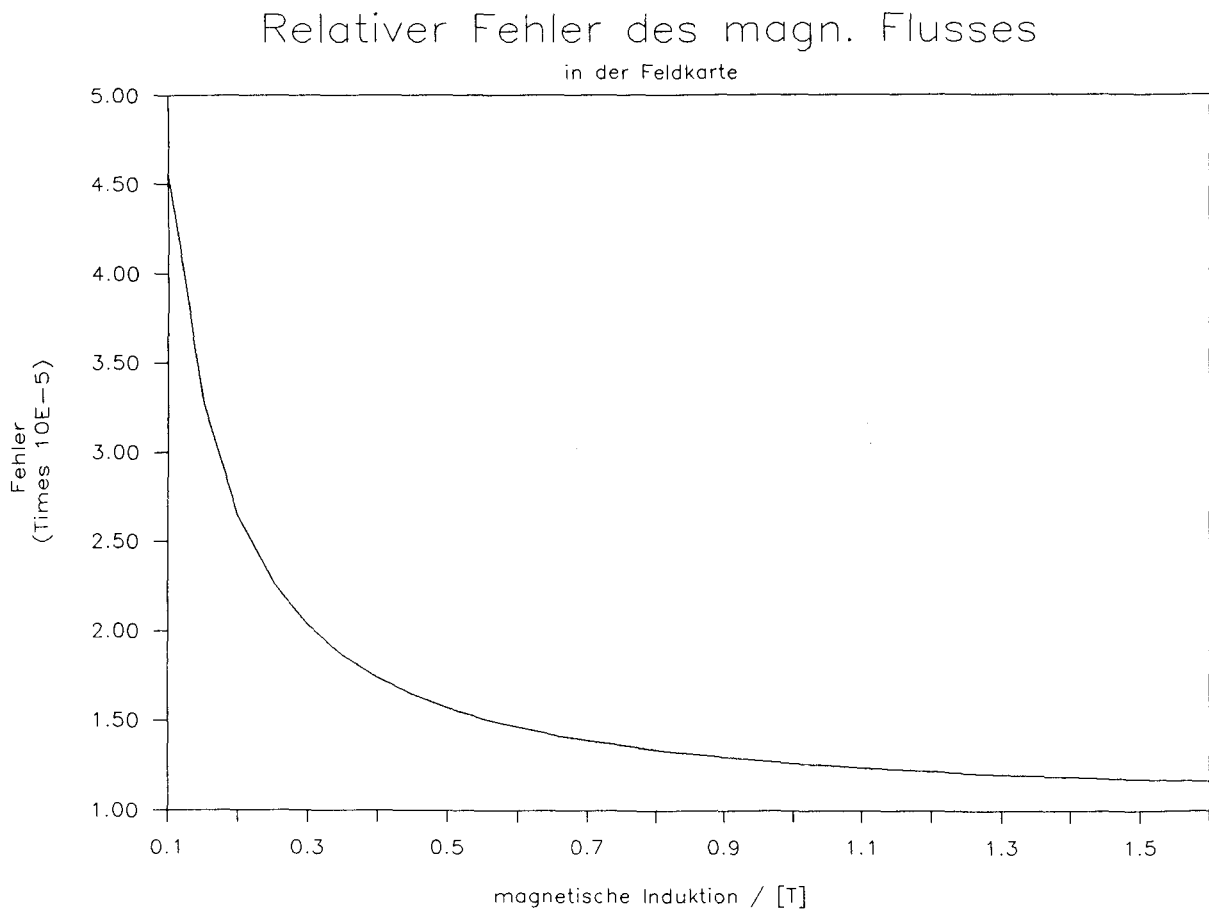


Abbildung 7.3: Fehler des magnetischen Flusses in der Feldkarte

Für einen anderen Gradienten hat die Kurve einen ähnlichen Verlauf, der in den Zahlenwerten nur gering abweicht. Er ist bei einem festen Feld von 0,8 T und einer Variation des Feldunterschiedes zwischen zwei Rasterpunkten von 10^{-2} T bis 10^{-6} T in der Abbildung 7.4 dargestellt.

Für eine Messung der Magnetisierungskurve von 0 T bis 1,6 T sind für verschiedene Anzahlen von Meßpunkten die relativen Fehler in der Abbildung 7.5 aufgetragen.

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

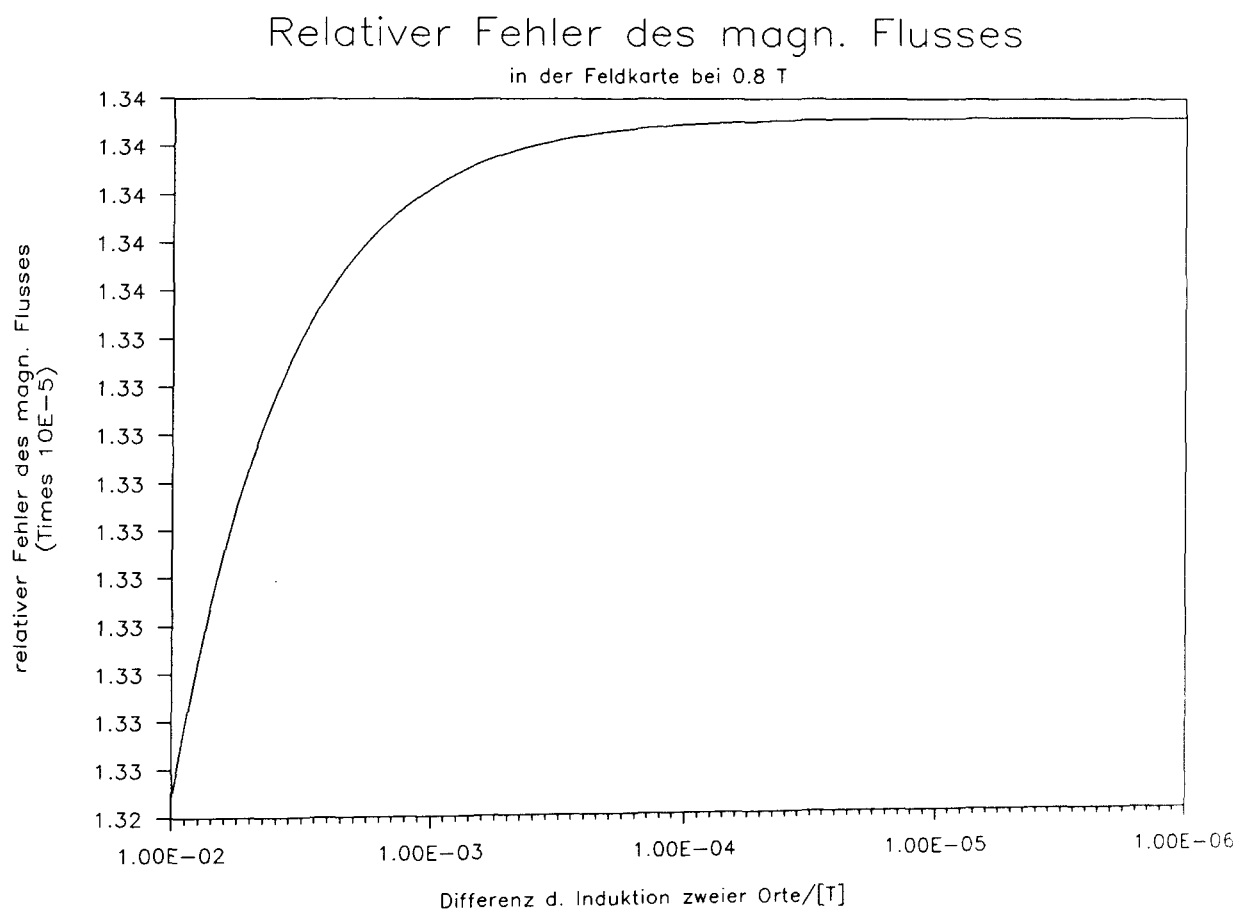


Abbildung 7.4: Fehler des magnetischen Flusses bei festem Feld und verschieden großen Felddifferenzen benachbarter Rasterpunkte

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

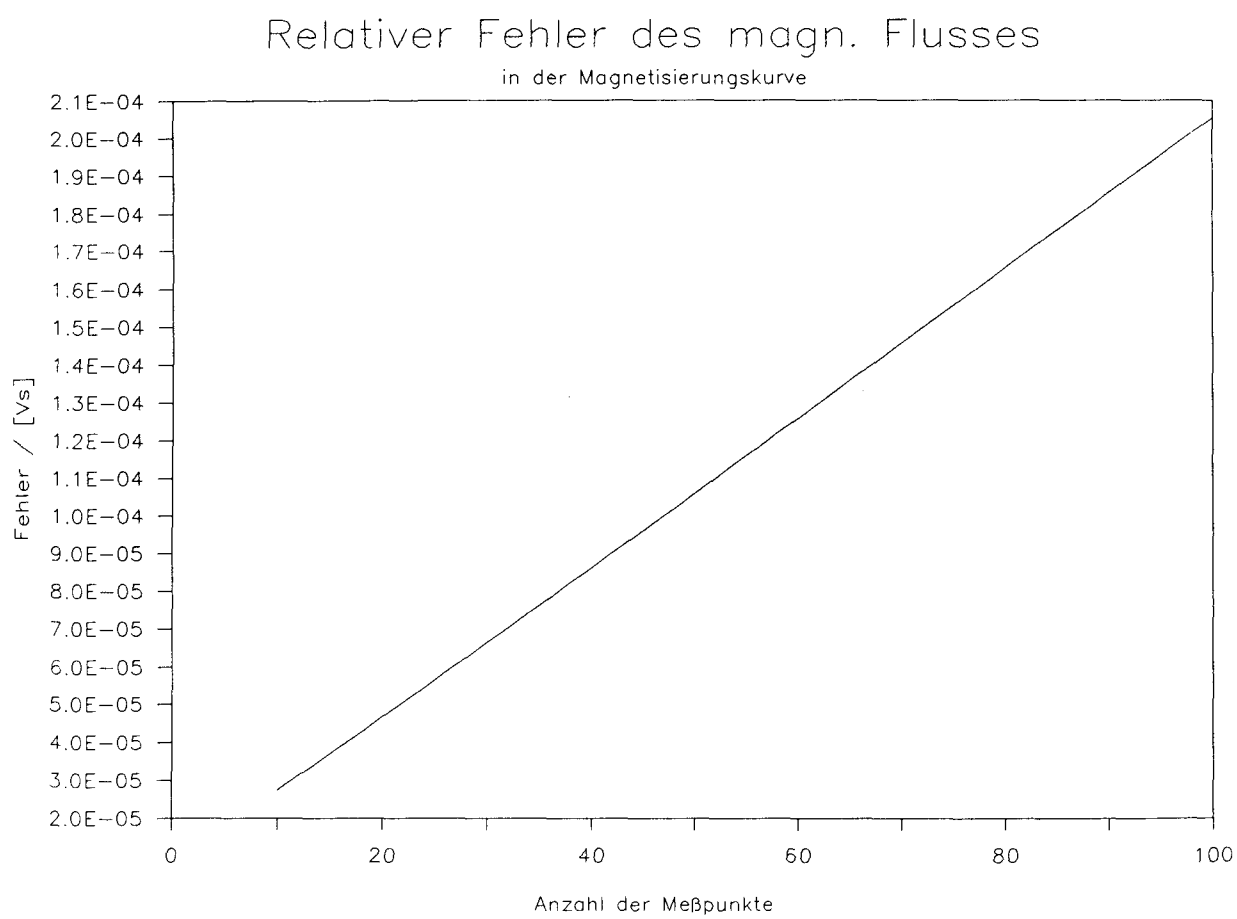


Abbildung 7.5: Fehler des magnetischen Flusses in der Magnetisierungskurve

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

7.3.3 Fehler in den Feldgrößen aus den Messungen der Magnetisierungskurve

Die Fehlerformel für die Bestimmung der magnetischen Induktion

$$B_k = \frac{1}{N_k A_k} \Phi_k$$

lautet

$$\Delta B_k = \frac{1}{N_k A_k} \sqrt{(\Delta \Phi_k)^2 + (\Delta A)^2 \left(\frac{\Phi_k}{A} \right)^2}.$$

ΔA ist für Vergleichsmessungen der Magnete untereinander die durch den Flächeneinschluß der Anschlußkabel bedingte Ungenauigkeit. Für die Fehlerbestimmung des absoluten Feldwertes muß die Unbestimmtheit in der Flächenkenntnis der Meßspule in ΔA mit einfließen.

Für die gezeigten Beispiele werden folgende Zahlen benutzt

$$N = 100$$

$$A = 3,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\Delta A = 2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$b = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Delta b = 5 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Wird der absolute Fehler auf die Differenz der Induktion zweier benachbarter Meßwerte bezogen, ergibt sich ein relativer Fehler, der in der Abbildung 7.6 dargestellt ist.

Der Fehler in

$$\int_{\lambda} \vec{B} d\vec{l} = \frac{1}{b} \sum_{k=0}^3 \frac{1}{N_k} \Phi_k + \frac{1}{b} \sum_{k=0}^2 A_{F k, k+1} B_a$$

für die vergleichende Messung zwischen den Magneten berechnet sich nach

$$\Delta \int_{\lambda} \vec{B} d\vec{l} = \frac{1}{bN} \sqrt{\sum_{k=0}^3 (\Delta \Phi_k)^2},$$

wenn $N = N_k$ für alle k .

Überschlägig gilt, wenn alle vier $\Delta \Phi_k$ etwa die gleiche Größe haben

$$\Delta \int_{\lambda} \vec{B} d\vec{l} = \frac{2}{bN} \Delta \Phi_k.$$

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

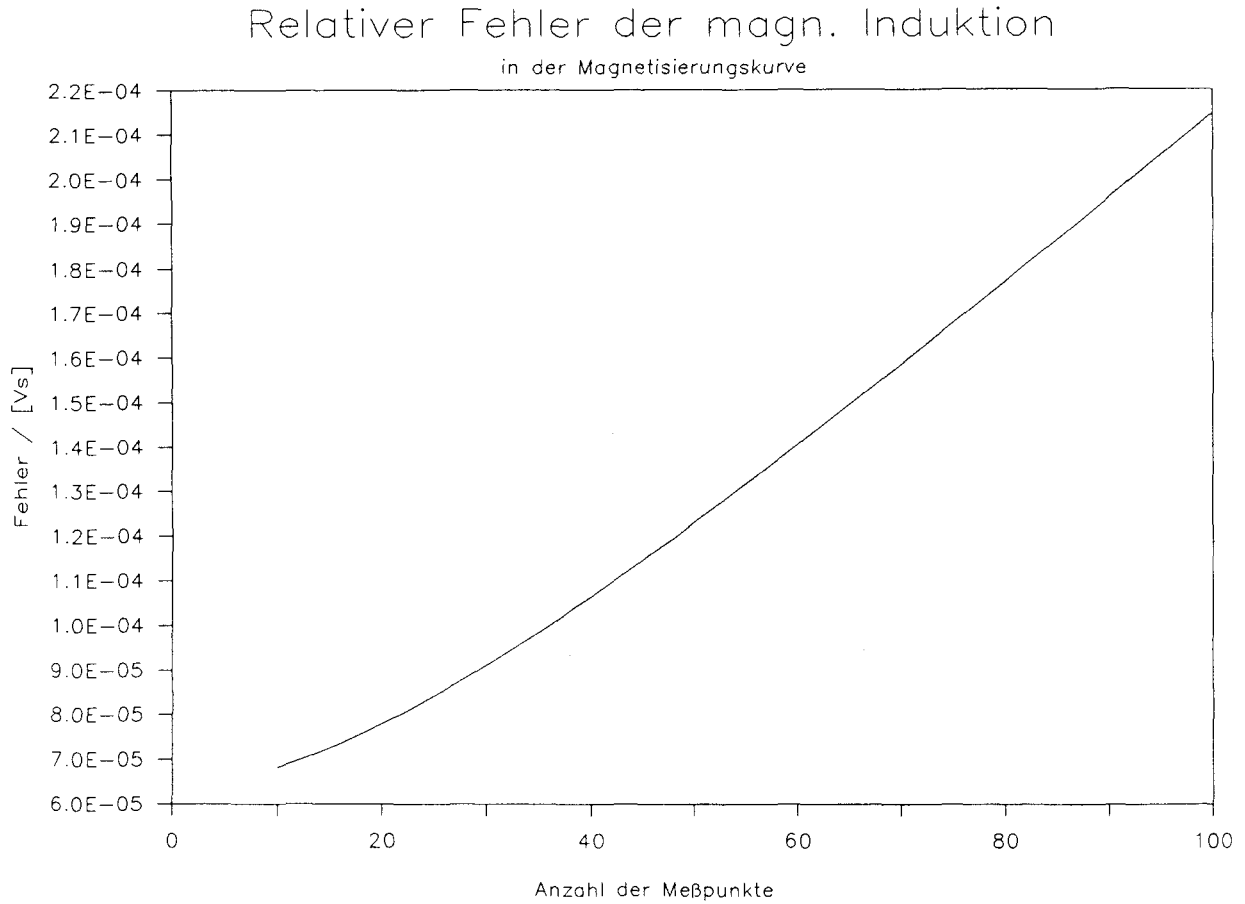


Abbildung 7.6: Relativer Fehler der magnetischen Induktion in der Magnetisierungskurve

Werden die Fehler wiederum auf die Differenz der Werte zweier benachbarter Meßpunkte bezogen, so zeigt die Abbildung 7.7 den relativen Fehler der Ablenkstärke.

Auch für die absolute Bestimmung des Fehlers von $\Delta \int_{\lambda} \vec{B} d\vec{l}$ kann der Fehler in $\frac{1}{b} \sum_{k=0}^2 A_{F k, k+1} B_a$ gegenüber den anderen Summanden vernachlässigt werden. Der Fehler berechnet sich nach

$$\Delta \int_{\lambda} \vec{B} d\vec{l} = \frac{1}{bN} \sqrt{\sum_{k=0}^3 (\Delta \Phi_k)^2 + (\Delta b)^2 \sum_{k=0}^3 \left(\frac{\Phi_k}{b}\right)^2}.$$

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

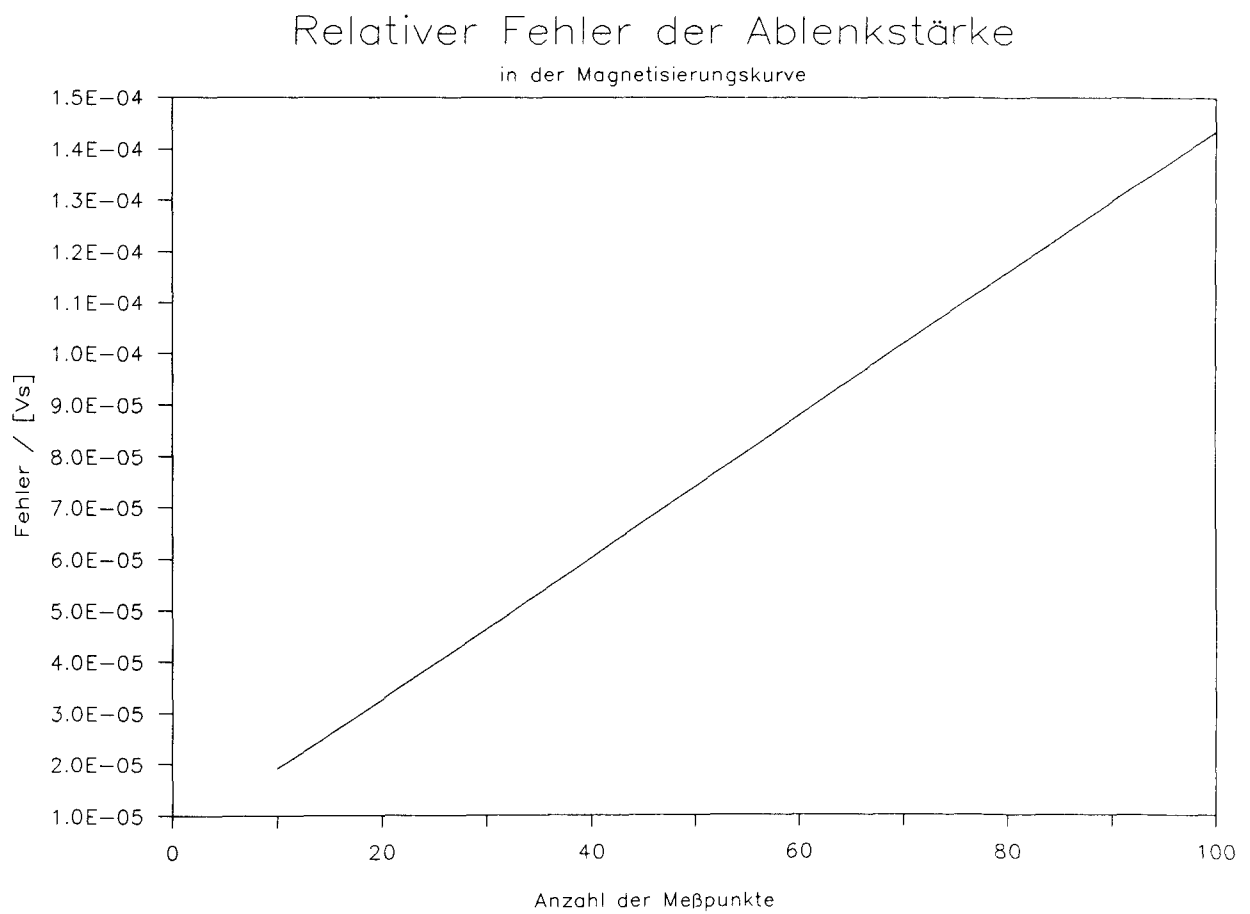


Abbildung 7.7: Relativer Fehler der Ablenkstärke in der Magnetisierungskurve

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

7.3.4 Fehler in den Feldgrößen der Feldkarte

Für die Bestimmung der magnetischen Induktion und der Ablenkstärke gelten dieselben Fehlerformeln wie zur Fehlerberechnung bezüglich der Magnetisierungskurve. Als Beispiel wird der magnetische Fluß aus Abschnitt 7.3.2 zugrunde gelegt. Diese relativen Fehler für die Feldkarte sind in den Abbildungen 7.8 und 7.9 gezeigt.

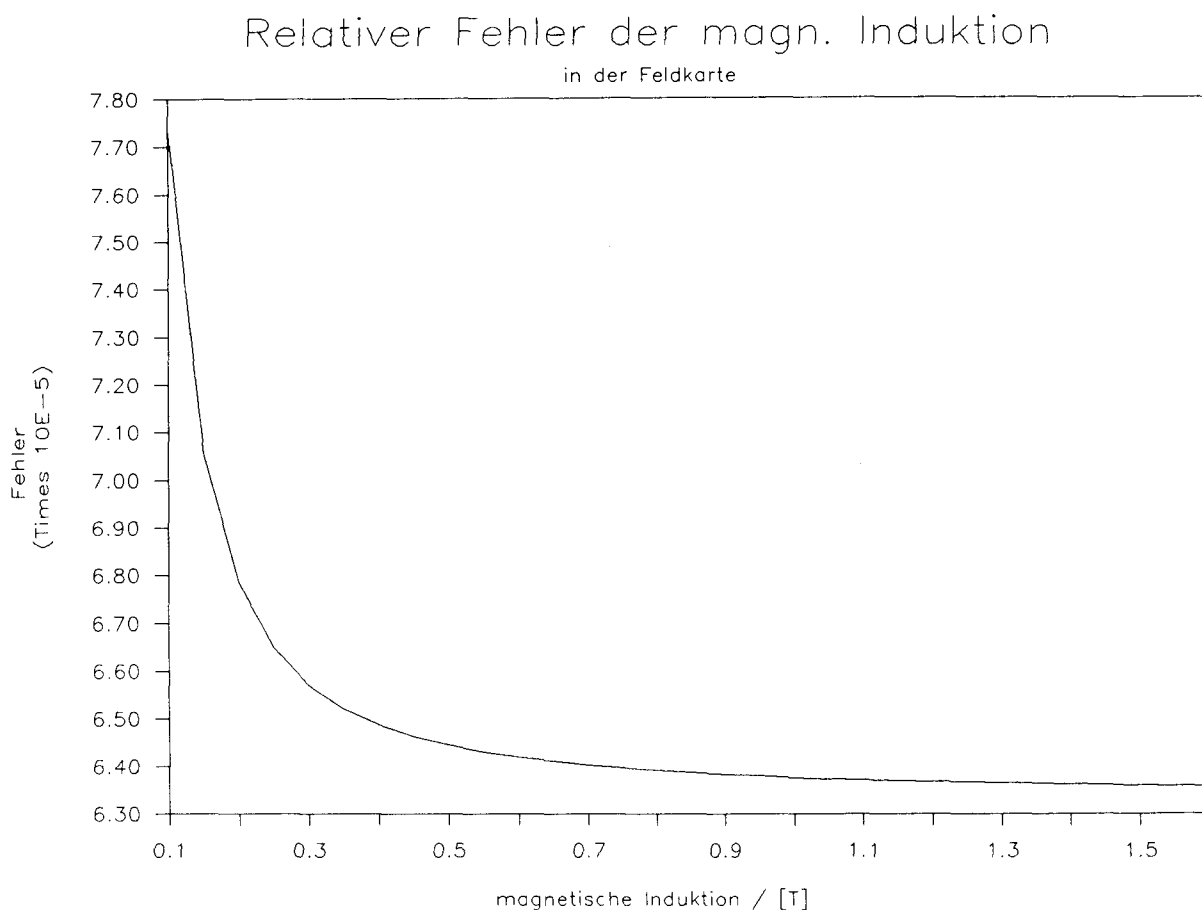


Abbildung 7.8: Relativer Fehler der magnetischen Induktion in der Feldkarte

Für den Fehler der effektiven Länge gilt die Gleichung

$$\Delta l_{eff} = \frac{1}{NbB} \sqrt{\sum_k (\Delta \Phi_k)^2 + (\Delta b)^2 \sum_k \left(\frac{\Phi_k}{b}\right)^2 + (\Delta B)^2 \sum_k \left(\frac{\Phi_k}{B}\right)^2}.$$

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

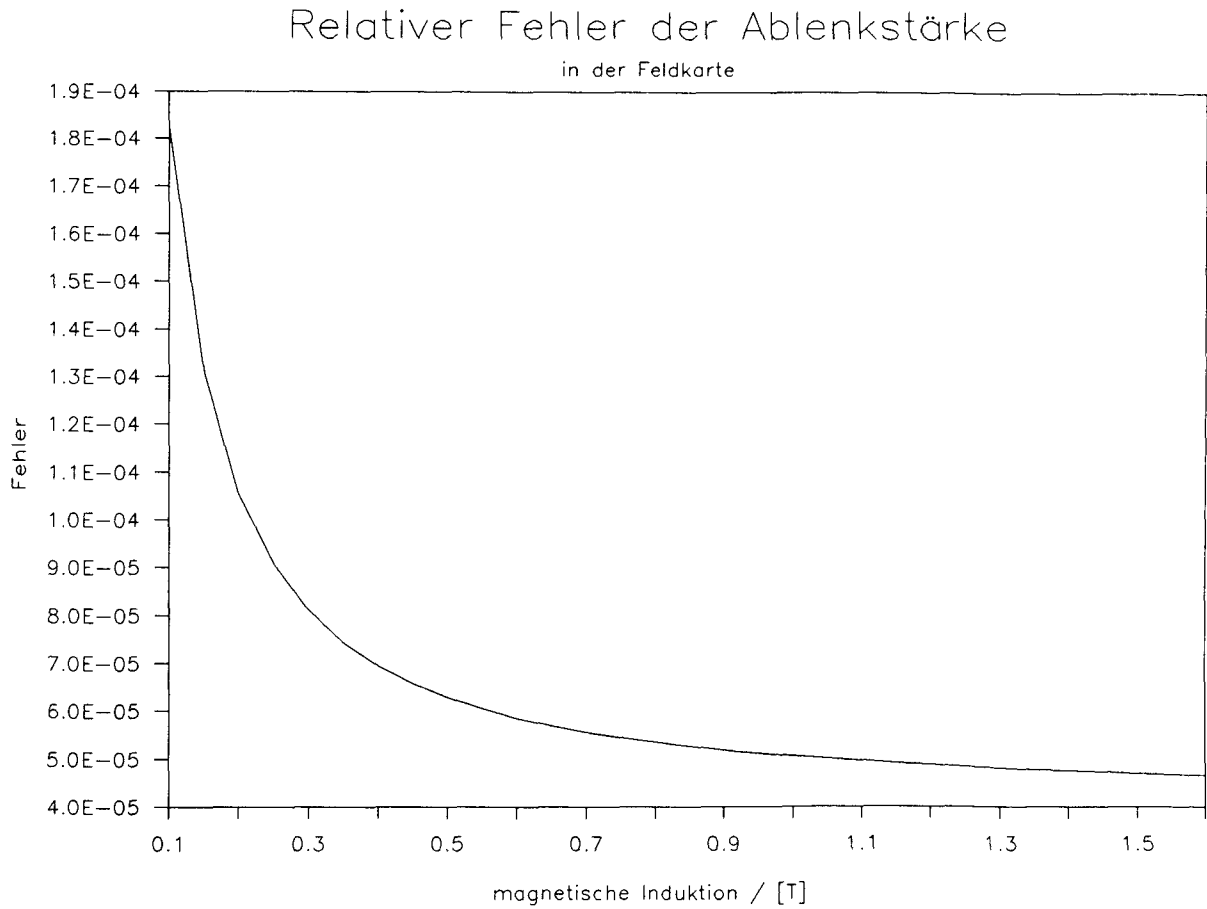


Abbildung 7.9: Relativer Fehler der Ablenkstärke in der Feldkarte

Für einen Vergleich der Magnete bezüglich der effektiven Längen wird der Fehler, bedingt durch die Unsicherheit der Spulenbreite, nicht berücksichtigt.

$$\Delta l_{effk} = \frac{1}{NbB} \sqrt{\sum_k (\Delta \Phi_k)^2 + (\Delta B)^2 \sum_k \left(\frac{\Phi_k}{B}\right)^2}$$

Die graphische Darstellung der relativen Fehler ist unter der Abbildung 7.10 zu finden.

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

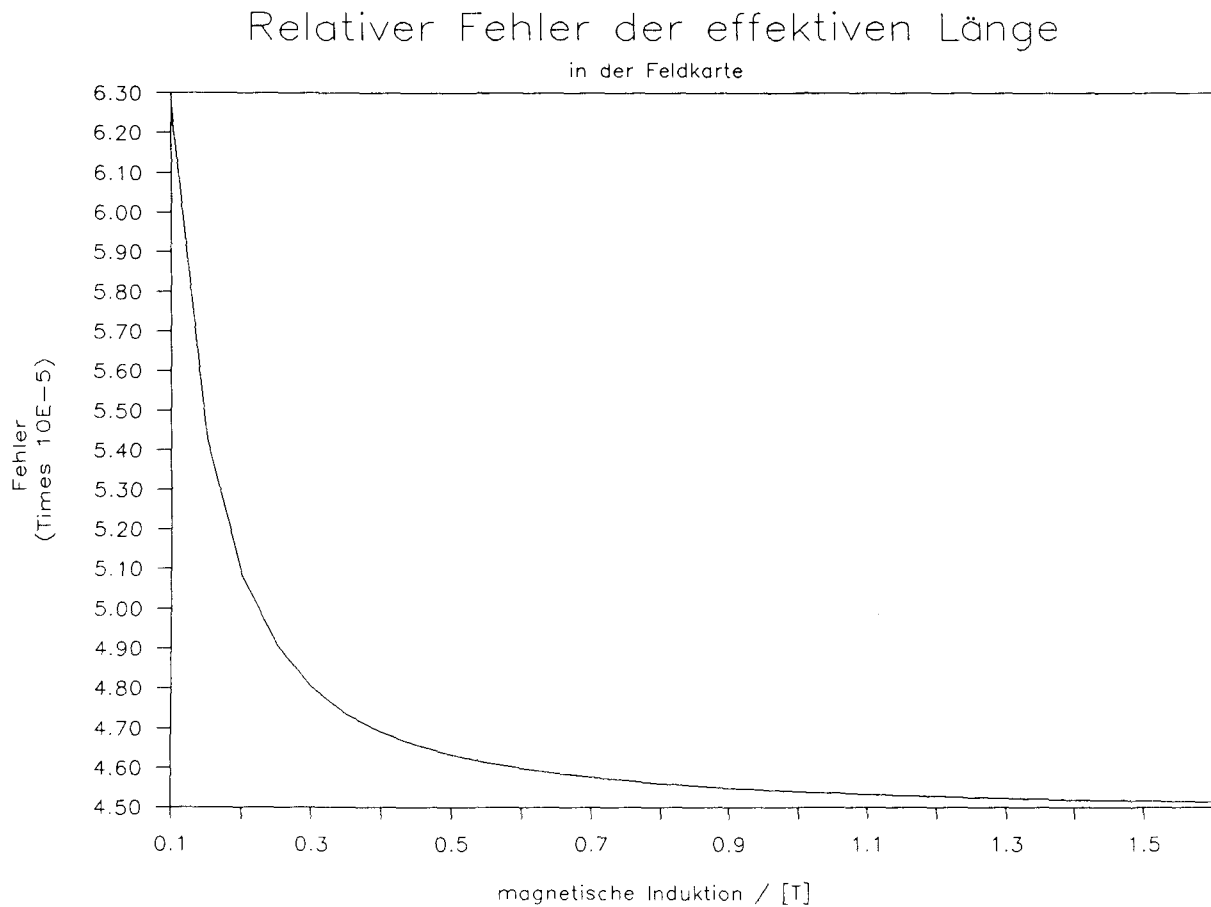


Abbildung 7.10: Fehler in der effektiven Länge

Der Fehler in der relativen Feldverteilung $\frac{\Delta B}{B} = \frac{B(x;y) - B(0;y)}{B(0;y)}$ berechnet sich nach

$$\Delta \left(\frac{B(x;y) - B(0;y)}{B(0;y)} \right)_k = \sqrt{\sum_k \left((\Delta \Phi_k(x;y))^2 \left(\frac{1}{\Phi_k(0;y)} \right)^2 + (\Delta \Phi_k(0;y))^2 \left(\frac{\Phi_k(x;y)}{\Phi_k^2(0;y)} \right)^2 \right)}.$$

Sind die Flußunterschiede von einem Ort zum anderen klein, was in

KAPITEL 7. MESSGENAUIGKEIT

einem nahezu homogenen Feld zu erwarten ist, so gilt

$$\Delta \left(\frac{B(x; y) - B(0; y)}{B(0; y)} \right)_k = \sqrt{\sum_k \left(2 \left(\Delta \frac{\Phi_k}{\Phi_k} \right)^2 \right)}.$$

Die zugehörige Kurve ist in der Abbildung 7.11 zu finden.

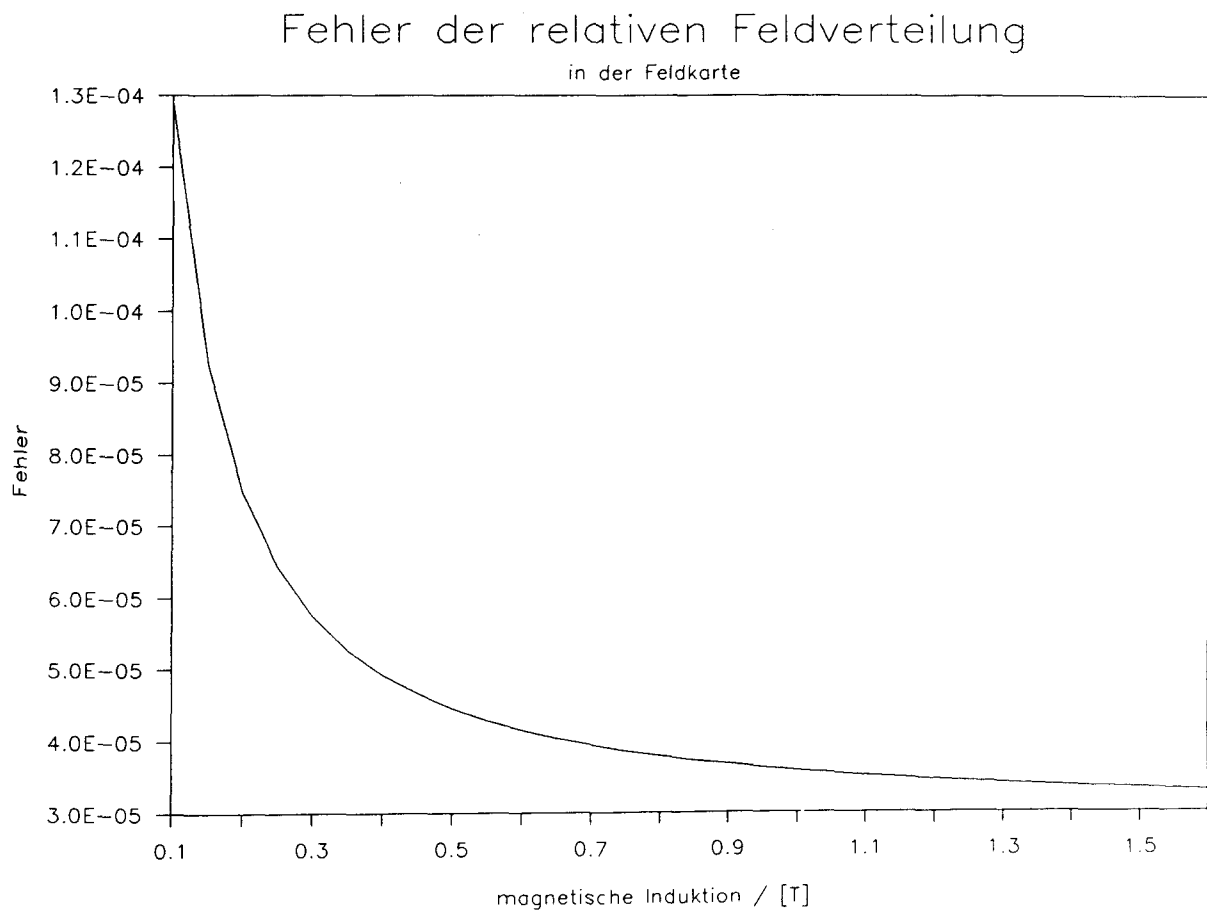


Abbildung 7.11: Fehler in der relativen Feldverteilung

Kapitel 8

Test der Meßanordnung

Für einen Test der Meßanordnung müssen zunächst bei den einzelnen Komponenten des Aufbaues die benötigten Spezifikationen, zum Beispiel Fertigungsmaße oder Meßgenauigkeiten, überprüft werden. Ohne deren Einhaltung ist die gewählte Genauigkeit des gesamten Aufbaues nicht einzuhalten. Die Überprüfung der einzelnen Teile wurde schon im Kapitel 5 Meßaufbau ab Seite 30 zusammen mit ihrer Beschreibung geschildert, um nicht den Bezug zwischen der Gerätebeschreibung und ihren erreichten Genauigkeitsanforderungen zu verlieren. Die Kontrollen sind hier zur Erinnerung nur stichwortartig aufgeführt. Soweit nicht anders angegeben, werden die Genauigkeitsanforderungen erfüllt.

Spule:

- Alle Abstände wurden mit mechanischen Meßuhren, Mikrometerschrauben und einer Lehre überprüft.
- Die Lage der Drähte in den gefrästen Nuten wurde in Vorversuchen mit Schliffbildern kontrolliert.
- Die Windungsfläche der Spulen wurde in einem genau vermessenen Magnetfeld kalibriert.

Positioniervorrichtung: Die Anfahrgenauigkeit wurde an verschiedenen Tischpositionen und nach verschiedenen langen Verfahrenswegen mit einem Laserinterferometer nachgemessen.

So konnte auch kontrolliert werden, ob die zugehörige Elektronik beim Zählen der Impulse einige Schritte verliert.

Systemvoltmeter: Die Spannungszeitintegration der einzelnen Systemvoltmeter wurden relativ zueinander verglichen. Dabei fiel auf, daß jedes Gerät eine charakteristische Abweichung zu den anderen Geräten besitzt. Diese Unstimmigkeit wurde durch Einführung von Korrekturfaktoren behoben.

KAPITEL 8. TEST DER MESSANORDNUNG

Die Reproduzierbarkeit der Integratoren über einen Zeitraum von 24 Stunden wurde durch eine Meßreihe untersucht.

Durch die Aufzeichnung aller Korrekturfaktoren ist jederzeit eine Kontrolle über das Langzeitverhalten der Integration möglich.

Strommessung: Der für die Messung verfügbare Nullflußstromwandler wurde in den Diplomarbeiten von Norbert Bales [Bale 89] und Herbert Schneider [Schn 89] ausgetestet.

Kernspinresonanzsonde: Eine Überprüfung der Meßgenauigkeiten war nicht möglich. Es war kein besser bekanntes Magnetfeld, als es die vom Hersteller spezifizierten Genauigkeiten fordern, verfügbar.

Hallsonde: Die Hallsonde wurde in einem bekannten Magnetfeld kalibriert. Ist ihre Meßgenauigkeit besser als 1%, so ist das in diesem Meßaufbau ausreichend.

Entsprechen die Einzelelemente den Spezifikationen, so wird deren Zusammenwirken kontrolliert.

Das Bindeglied in diesem Meßaufbau ist das Meßprogramm. Es wurde ebenso wie die Geräte in seinen Programmteilen einzeln und im Zusammenwirken ausgetestet. Einige notwendige Testroutinen sind in einem eigens dazu angelegten Menü enthalten. Für spätere Wartungen oder Änderungen am Programm können sie benutzt werden.

Um den gesamten Meßaufbau zu testen, wurde ein Dipolmagnet mit zugehörigem Netzteil vom CERN-PS ausgeliehen. Der Magnet hat den COSY-Dipolen ähnlichen Eigenschaften. An ihm wurden die Meßabläufe ausprobiert.

Die Reproduzierbarkeit der Magnetfeldmessungen konnte im Rahmen der geforderten Meßgenauigkeit nicht überprüft werden, da das verfügbare Netzgerät keine geglättete Spannung besitzt.

Sobald der erste Prototyp der COSY-Dipole ausgeliefert ist, wird dieser Test mit diesem und einem stabilen Netzgerät durchgeführt.

Kapitel 9

KAPITEL 9. LITERATURVERZEICHNIS

Literaturverzeichnis

- [Bale 89] N. Bales: Diplomarbeit, Jülich 1989
- [Berg 85] G. Berg (Hrsg.): COSY-Arbeitstreffen über geplante Experimente im Bereich der Kerphysik und Mittelenenergiephysik, Jül-Spez-345, Jülich 1986
- [Bevi 68] P.R. Bevington: Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, 1968
- [Broe 86] H.J. Breockmann: Diplomarbeit Magnetdynamische Studie für einen Oktupol mit variablen Feldern, Münster 1986
- [COSY 86] Kühler-Synchrotron COSY, Technische Beschreibung COSY, Jül-Spez-370, Jülich 1986
- [EPAC 88] U. Bechstedt, N. Bongers, W. Briell, A. Hardt, W. Klein, U. Schwarz, E. Veiders: Magnets and power supplies for COSY Jülich, 1st Europ. Part. Acc. Conf., Rom 1988
- [Groß 81] S.Großmann: Mathematischer Einführungskurs für die Physik, Stuttgart 1981
- [Halb 69] K. Halbach: First Order Perturbation Effects in Iron-Dominated Two-Dimensional Symmetrical Multipoles, Nuclear Instruments and Methods 74 , 1969
- [Halb 76] K. Halbach: Effect of Variable Measurement Coil Displacement on the Determination of the Harmonic Content of a Multipole, 1976
- [Hardt 88] A.Hardt: COSY-Ablenkmagnete Mechanische und Magnetische Daten, Jülich 1988
- [Holl 88] Y. Holler, O. Kaul, K. Sinram: Field Measurements and Sorting of the HERA E-Ring Dipoles, EPAC 1988
- [Holz 88] B. Holzer: Diplomarbeit Präzisionsmessungen an den Magneten des TSR-Speicherringes, Heidelberg 1988
- [Karl 83] S. Martin, A. Hardt, J. Meißburger, G. Berg, U. Hacker, W. Hürlimann, J. Römer, T. Sagefka, A. Retz, O. Schult, K. Brown, K. Halbach: The QQDDQ magnet spectrometer "BIG KARL", Nuclear Instruments and Methods 214, 1983
- [Kneu 82] F. Kneubühl: Repetitorium der Physik, Stuttgart 1982
- [Krol 88] G. Krol: Meßprotokoll der Positioniervorrichtung SM2000, Jülich 1988
- [MaKu 84] T. Mayer-Kuckuk: Kernphysik, Stuttgart 1984
- [MaKu 88] T. Mayer-Kuckuk: Das Kühler-Synchrotron COSY und seine physikalischen Perspektiven, Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Vorträge N 359, 1988
- [Mart 89] S. Martin: Seminarvortrag: Charakterisierung der Dipole mit Hilfe der Feldmessungen, Jülich 1989

KAPITEL 9. LITERATURVERZEICHNIS

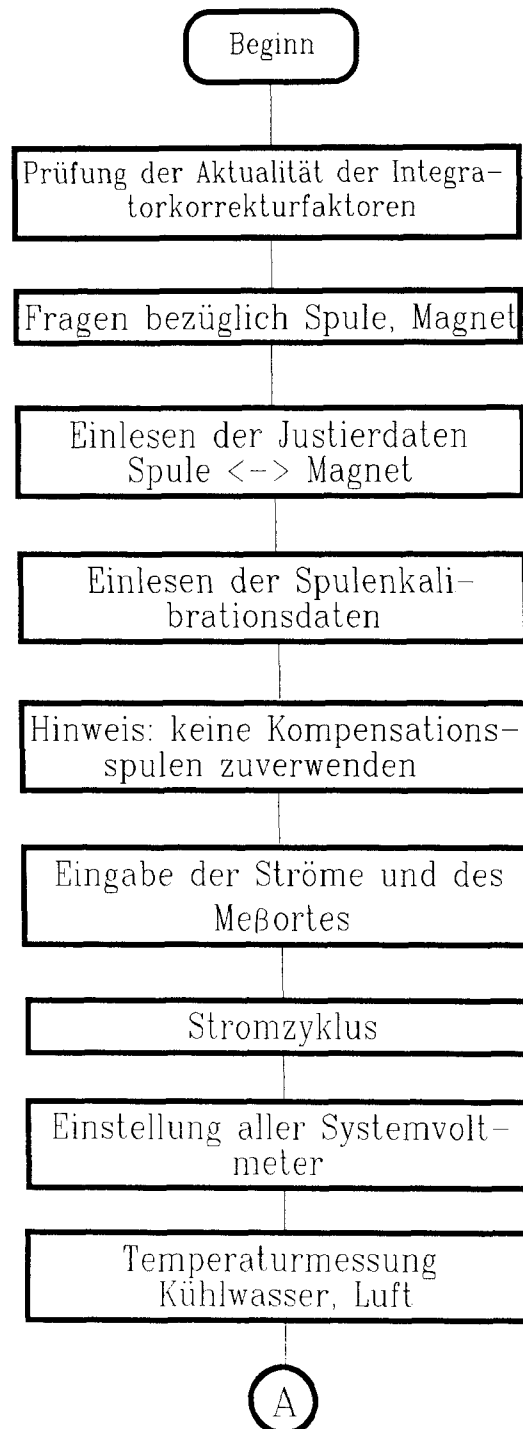
- [Metr 86] Metrolab: Handbuch zur Kernspinresonanzsonde, Genf 1986
- [Näge 88] W. Nägele, Mündliche Mitteilungen, Genf 1988
- [Oele 87] W. Oelert (Hrsg.): Internal targets for COSY, Jül-Spez-409, Jülich 1987
- [Sage 88] T. Sagefka: Meßprotokoll zur Kalibration von Hollsonden, Jülich 1988
- [Schl 88] Mitarbeiter von Schlumberger München Hr. Neidig: telefonische Mitteilung, 1988
- [Schn 89] H. Schneider: Diplomarbeit, Jülich 1989
- [SM 88] SM Elektronik GmbH: Handbuch zur Steuerung SM 2000, Schwenningen 1988
- [Ture 88] P. Turek (Hrsg.): CANU-Arbeitstreffen über Experimentvorschläge am Kühlersynchrotron COSY-Jülich, Jül-Spez-489, Jülich 1988
- [Wats 65] P. G. Watson, R. F. DiGregorio: Techniques of Magnetic-Field Measurement, Magnetotechnology Conference 1965
- [Wind 70] H. Wind: Evaluating a Magnetic Field Component from Boundary Observations only, Nuclear Instruments and Methods 84 , 1970

Kapitel 10

Anhang

KAPITEL 10. ANHANG

10.1 Ablaufdiagramme



KAPITEL 10. ANHANG

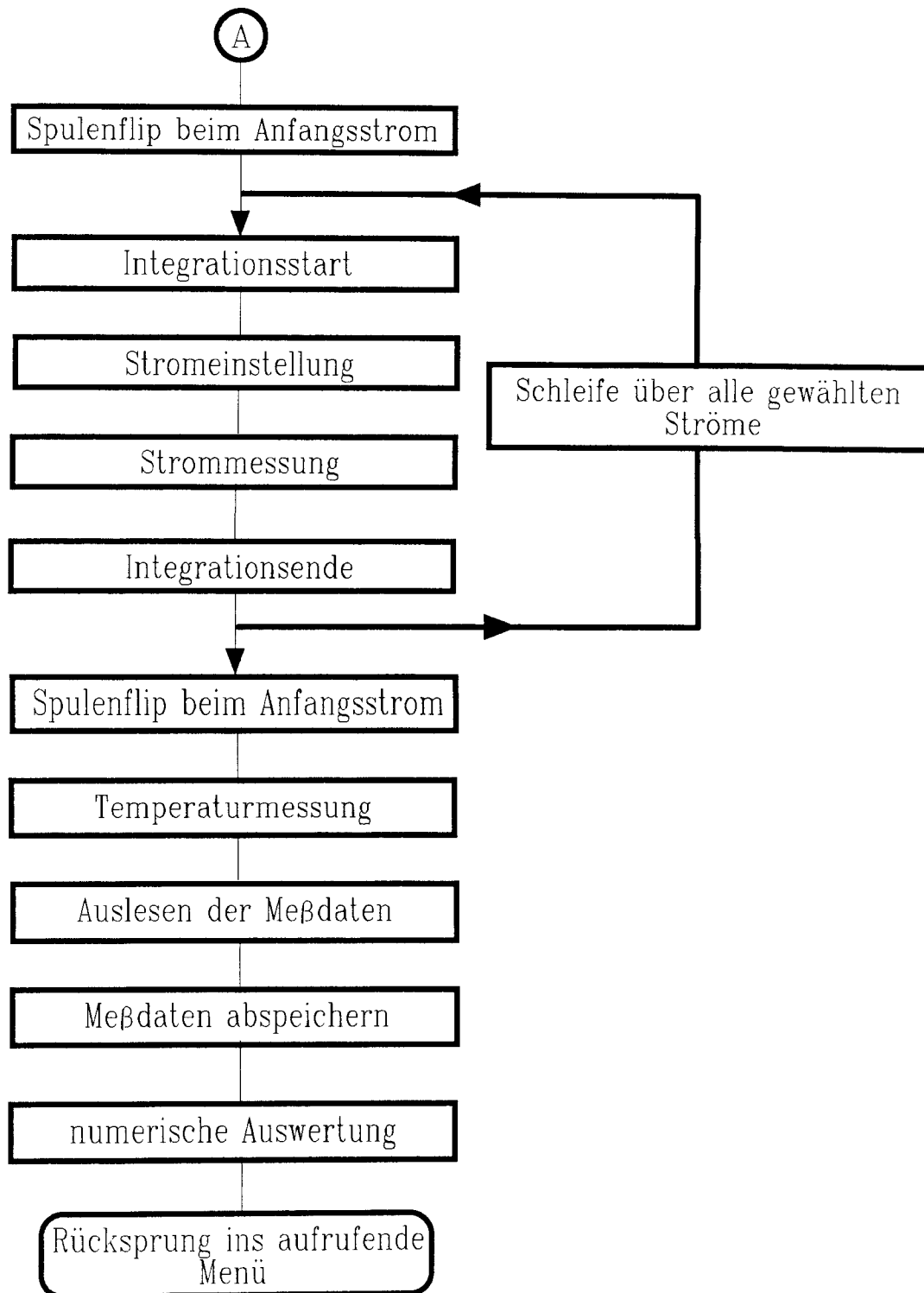
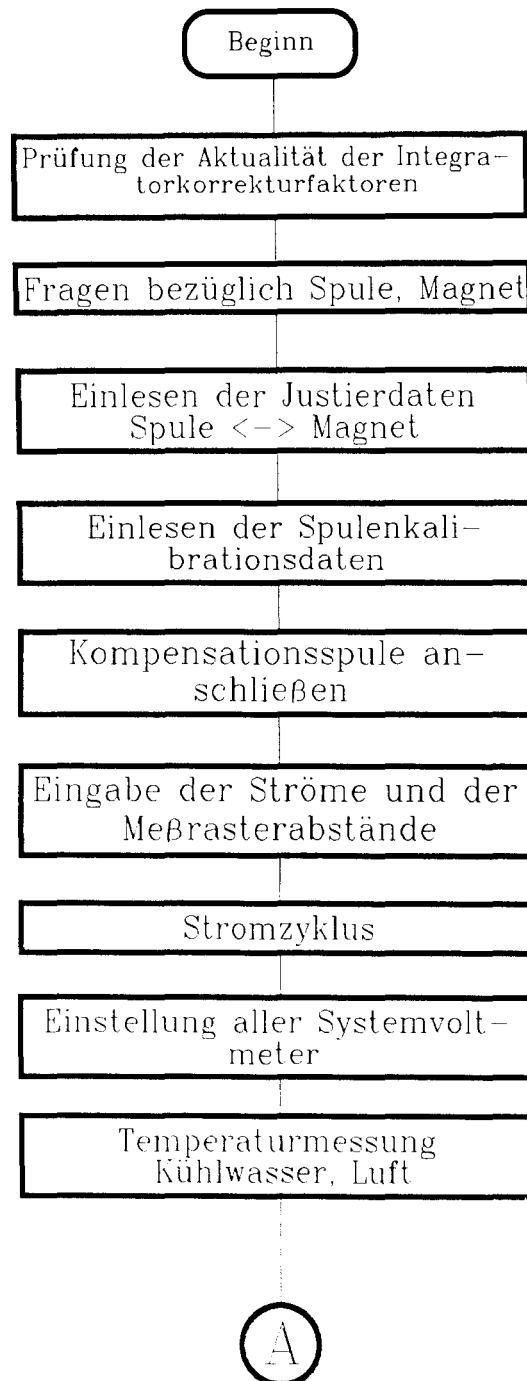
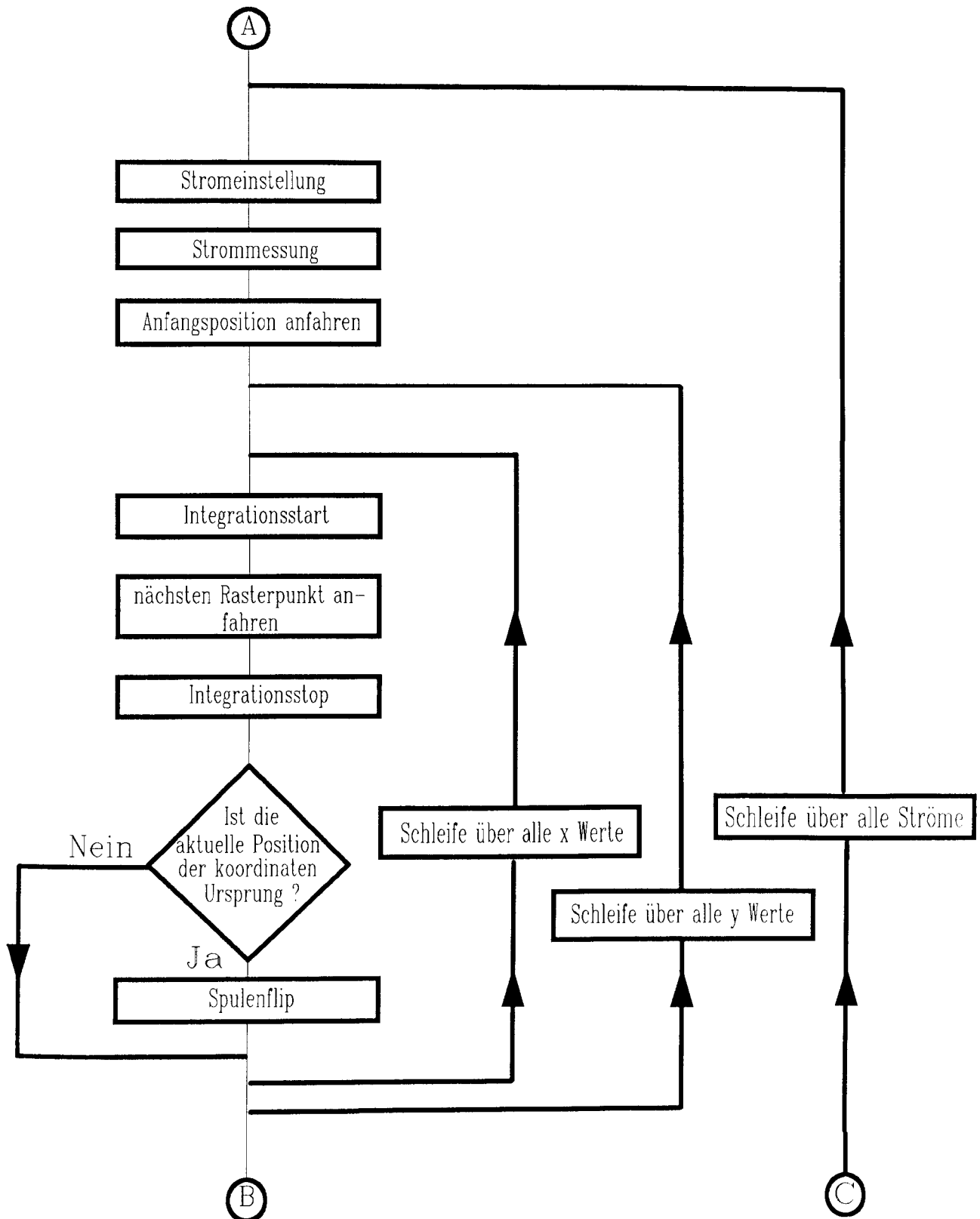


Abbildung 10.1: Ablaufdiagramm des Programmtails zur Messung der magnetischen Erregungskurve.

KAPITEL 10. ANHANG



KAPITEL 10. ANHANG



KAPITEL 10. ANHANG

10.2 Magnetdaten

COSY-Ablenkmagnete		
Magnettyp	C	Dipol
Anzahl	24	Stück
Polspalthöhe	90	mm
Ablenkradius	7000	mm
Ablenkwinkel	15	°
Kantenwinkel	7,5	°
effektive Länge	1833	mm
Eisenlänge	1761	mm
Eisenbreite	1153	mm
Eisenhöhe	1690	mm
Fläche des Spulenfensters	155 × 490	mm ²
Eisengewicht	~ 25	t
magnetische Induktion	0,13 < B < 1,58 T	
Induktionsanstieg	1	$\frac{T}{s}$
Sagitta	60	mm
Nutzbarer Feldbereich transversal mit $\frac{\Delta B}{B} = \pm 10^{-4}$		
bei der Injektion in y-Richtung	±30	mm
bei der Injektion in x-Richtung	±70	mm
bei Maximalenergie in y-Richtung ungekühlt	±12	mm
bei Maximalenergie in x-Richtung	±30	mm
Identität bzgl. $\int B dl$ aller Dipole	2×10^{-4}	

Tabelle 10.1: Daten der Ablenkmagnete

KAPITEL 10. ANHANG

10.3 Spulendaten

Länge des Spulenträgers	4610 mm
Breite des Spulenträgers	44 mm $\pm 0,01$ mm
Höhe des Spulenträgers	20 mm $\pm 0,01$ mm
Werkstoff	CFK und Hart-schaumlaminat
Dicke des CFK an Ober-, Unterseite	2,5 mm
Dicke des CFK an den Längsseiten	0,5 mm
Durchbiegung bei Auflageabstand von 4 m	5 mm
Durchbiegung bei Auflageabstand von 2 m	0,5 mm
Anzahl der Nuten auf Ober-, Unterseite	4
Nuttiefe	1,2 mm $\pm 0,01$ mm
Nutbreite	0,92 mm $\pm 0,01$ mm
Abstand der Mitten der äußeren-Nut von der inneren Nut	5 mm $\pm 0,005$ mm
Abstand der äußeren Nuten vom Rand	2 mm
Anzahl der Drähte einer HF-Litze	100
Durchmesser der HF-Litze	1,04 mm
Durchmesser des Einzeldrahtes	0,071 mm

Tabelle 10.2: Daten zur Spulengeometrie. Angaben zu den einzelnen Spulen sind in den Dateien zur Spulenkibration abgespeichert.

KAPITEL 10. ANHANG

Pinnummer	Spulenbezeichnung
Seite mit kleinen Spulennummern	
1/2	a0
3/4	a1
5/6	b0
7/8	b1
9/10	c0
11/12	d0
Seite mit großen Spulennummern	
1/2	a2
3/4	a3
5/6	b2
7/8	b3
9/10	c1

Tabelle 10.3: Steckerbelegung der Spulenträger

KAPITEL 10. ANHANG

10.4 Tischsteuerungsdaten

Verfahrweg horizontal	1000 mm
Verfahrweg vertikal	160 mm
Positioniergenauigkeit beider Achsen	0,01 mm
Achsenbezeichnung horizontal	B;C
Achsenbezeichnung vertikal	V;W
Einstellung der RS232-Schnittstelle:	
Baudrate	9600
Parität	gerade
Anzahl der Datenbits	7
Anzahl der Stopbits	2

Tabelle 10.4: Daten zur Positioniervorrichtung

KAPITEL 10. ANHANG

Hauptmenü Nr. 7:	
Parameterblock 1:	
1 Referenzlauflage	BC;VW
2 Autostart	N
3 Stop bei E1	N
4 Pos. Halt bei E3	N
5 Vorschub in mm	J
.	
.	
.	
8 Antriebsart wählen	alle Achsen auf Schrittmotoren einstellen
9 Offsetkorrektur	X Y Z A B 0. C 0. V 0. W 0.
Parameterblock B: (gilt auch für C,V und W)	
A Datenformat	2.
B Getriebe Faktor Zähler	1.
C Getriebe Faktor Nenner	2.
D Schleppfaktor	2000.
E Rampe	100.
F KV-Faktor	1.0
G Regelfaktor A	0.02
H + Verfahrbereich	+10000.00 mm
I – Verfahrbereich	-10000.00 mm
J Eilgang	15000.00 Hz
K Referenzlaufgeschw.	-5000.00 Hz
L Spiealausgleich	0.
M Fertigmeldung der Endpos.	5.
N Freigabe des Referenzschalters	200.

Tabelle 10.5: Parametereinstellungen der Positioniervorrichtung

Die vorliegende Arbeit wurde im Institut für Schichten und Ionentechnik der KFA-Jülich durchgeführt.

Ich danke Herrn Prof. Dr. K. Kilian und Herrn Prof. Dr. J. Ernst für ihr Interesse an der Diplomarbeit und für die Übernahme des Referates und des Korreferates.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. A. Hardt und Herrn Dr. U. Bechstedt für die vorliegende Themenstellung und ihre ständige Bereitschaft zur Diskussion.

Einen herzlichen Dank auch an Herrn W. Nägele für die freundliche Aufnahme während meines Aufenthaltes im CERN und für seine Hilfe bei der Spulenkalibration.

Weiternhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Gruppe ISI-COSY für die gute Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere bei Herrn Dr. U. Schwarz und Herrn Dr. S. Martin, die für Fragen immer zur Verfügung standen; bei Herrn G. Krol für die Fotos der Arbeit und die Justierung der Meßmaschine; bei Herrn G. Dolfus und Herrn T. Sagefka für wochenlange Lötarbeiten an Meßspulen; bei Herrn L. Wentzler für seine Hilfe bei der Erstellung der Zeichnungen, bei Frau A. Weinert, Herrn K. Henn und Herrn U. Hacker für die Wartung der Computer und bei Herrn C. Lippert für den ständigen Gedankenaustausch.