



FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GmbH

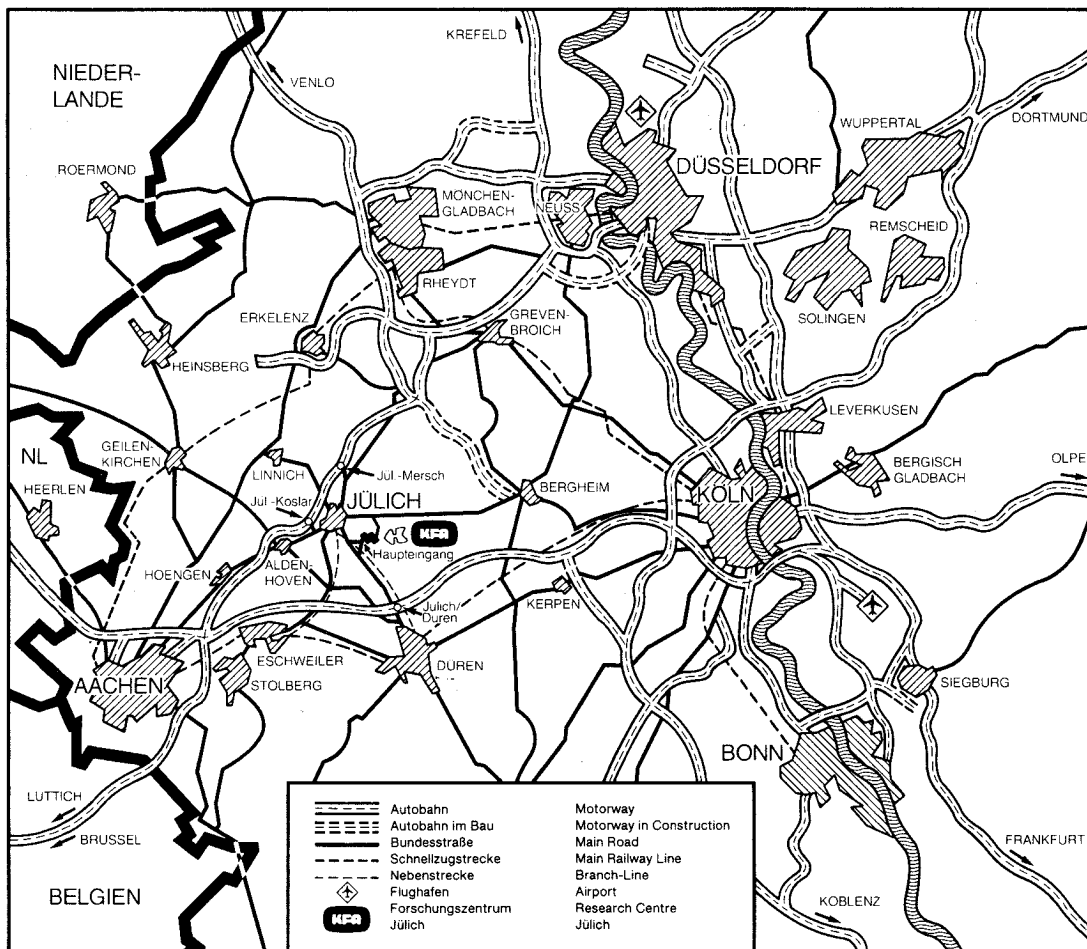
Institut für Kernphysik

**Aufbau und Inbetriebnahme
einer Dipolfeldmeßmaschine
zur Streufeldvermessung
von COSY-Dipolen**

von

Michael Rook

Jül-2407
November 1990
ISSN 0366-0885



Als Manuskript gedruckt

Forschungszentrum Jülich: Berichte Nr. 2407
Institut für Kernphysik Jül-2407

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK · Forschungszentrum Jülich GmbH
 Postfach 19 13 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)
 Telefon: 02461/61-0 · Telex: 833 556-70 kfad · Telefax: 02461/61-61 03

**Aufbau und Inbetriebnahme
einer Dipolfeldmeßmaschine
zur Streufeldvermessung
von COSY-Dipolen**

von

Michael Rook

Zusammenfassung

Diese Arbeit befaßt sich mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme einer Dipolfeldmeßmaschine zur Vermessung der Streufelder von Dipolen des COSY-Speicherrings. Die Feldmeßmaschine dient der Erstellung von 3-dimensionalen Feldkarten der COSY-Dipole mittels Hallsonden, mit denen eine Ortsauflösung in der Feldkarte von 0,1 mm erreicht wird. Die Feldauflösung liegt in der Größenordnung 10^{-4} T.

Der Meßaufbau ist so flexibel gestaltet, daß Feldkartenmessungen auch an anderen Multipolmagneten durchgeführt werden können. Die Steuerung des Meßprozesses sowie die Aufbereitung der Meßdaten wird von einem Steuerprogramm übernommen. Erste Meßergebnisse zeigen, daß eine Messung der Hauptkomponente eines Dipolfeldes mit genügender Genauigkeit durchgeführt werden kann, während die Bestimmung kleiner Feldkomponenten erst nach Verbesserung der Meßsondenhalterung zufriedenstellend erfolgen kann.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	COSY	1
1.2	Magnete für COSY	3
1.3	Aufgabenstellung	5
1.4	Kapitelübersicht	6
2	Theoretische Grundlagen	8
2.1	Grundgleichungen der Magnetostatik	8
2.2	Hysterese	9
2.3	Koordinatensysteme	10
2.4	Potentiale und Multipolentwicklung	11
2.5	Grundbegriffe der Ionenoptik eines Dipols	14
2.6	Halleffekt	17
3	MESSAUFBAU	20
3.1	Die Feldmeßmaschine - ein Überblick	20
3.2	Positioniervorrichtung	22
3.2.1	3-Achsen-Meßtisch	22
3.2.2	Tischsteuerung	24
3.2.3	Fahrminimik	27

3.2.4	Meßsondenhalterung	28
3.3	Meßapparatur	29
3.3.1	Meßsonden	29
3.3.2	Digitalvoltmeter	31
3.4	Rechner	32
4	Betrieb der Feldmessmaschine	33
4.1	Das Steuerprogramm „hall“	33
4.1.1	Programmentwicklung	33
4.1.2	Programmstruktur und Handhabung	35
4.1.3	Benutzeroberfläche	35
4.2	Datenorganisation	36
4.2.1	Allgemeine Datenorganisation	36
4.2.2	Organisation der Meßwertdateien	38
4.2.3	Datensicherung	39
4.3	Vorbereitung einer Feldkartenmessung	39
4.3.1	Wahl der Meßparameter	40
4.3.2	Test & Initialisierung der Systemvoltmeter	41
4.3.3	Justierung der Feldmeßmaschine	41
4.4	Messung einer Feldkarte	44
4.4.1	Wahl einer Meßtischposition	44
4.4.2	Setzen eines Erregungsstroms	45
4.4.3	Wahl des Meßbereichs	45
4.4.4	Meßablauf	46
4.5	Auswertung der Meßdaten	47
4.5.1	Wahl einer Feldkarte	48

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	iv
4.5.2 Darstellung absoluter und relativer Feldverteilungen	49
4.5.3 Bestimmung von Ablenkstärke und effektiver Länge	50
4.5.4 Polynomanpassung	53
5 Messgenauigkeit und Messergebnisse	55
5.1 Meßgenauigkeit	55
5.1.1 Positioniergenauigkeit	55
5.1.2 Winkelfehler	57
5.1.3 Auflösung der Hallsonde	59
5.1.4 Fehler in der Magnetfeldmessung	59
5.1.5 Fehler der Kenngrößen des Magnetfelds	61
5.2 Meßergebnisse	64
5.3 Schlußbemerkung	78
6 Anhang	79
6.1 Daten der COSY-Dipole	80
6.2 Kenndaten der Meßsonden	81
6.2.1 Daten der Hallsondenträger	81
6.2.2 Daten der Hallsonde SBV 601-S1	81
6.2.3 Pinbelegung des Anschlußsteckers	82
6.3 Daten der Tischsteuerung	82
6.3.1 Parameterblöcke der Tischsteuerung	82
6.3.2 Konfiguration der RS232-Schnittstelle	83
7 LITERATURVERZEICHNIS	84

Kapitel 1

Einleitung

1.1 COSY

Im Forschungszentrum Jülich wird derzeit das **Cooler Synchrotron COSY** erbaut. COSY besitzt die Aufgabe, Teilchenstrahlen hoher Phasenraum-dichte im Energiebereich von 40 MeV bis maximal 2,5 GeV zu erzeugen.

Eine gleich hohe Strahlqualität über diesen großen, variablen Energiebereich zeichnet COSY vor bestehenden Beschleunigeranlagen ähnlichen Typs aus. Durch die gesteigerte Energieauflösung des Teilchenstrahls sind neuartige Experimente im Bereich der Kern- und Mittelenergiephysik möglich, die zu einem besseren Verständnis der starken Wechselwirkung führen [COSY 86].

Die geometrische Struktur von COSY erinnert an ein Oval. Die geraden Sektionen ermöglichen den Einbau eines Elektronenkühlers und die Errichtung interner Targetplätze. Durch Gruppen von Quadrupolmagneten können hier die ionenoptischen Eigenschaften eines Teilchenstrahls entsprechend den Erfordernissen für Experimente an internen Targets manipuliert werden.

Die kreisförmigen Sektionen dienen der Rückführung des Strahls auf eine geschlossene Umlaufbahn. Hier schließen auch die Injektions- und Extraktionsstrahlführung an den Speicherring an.

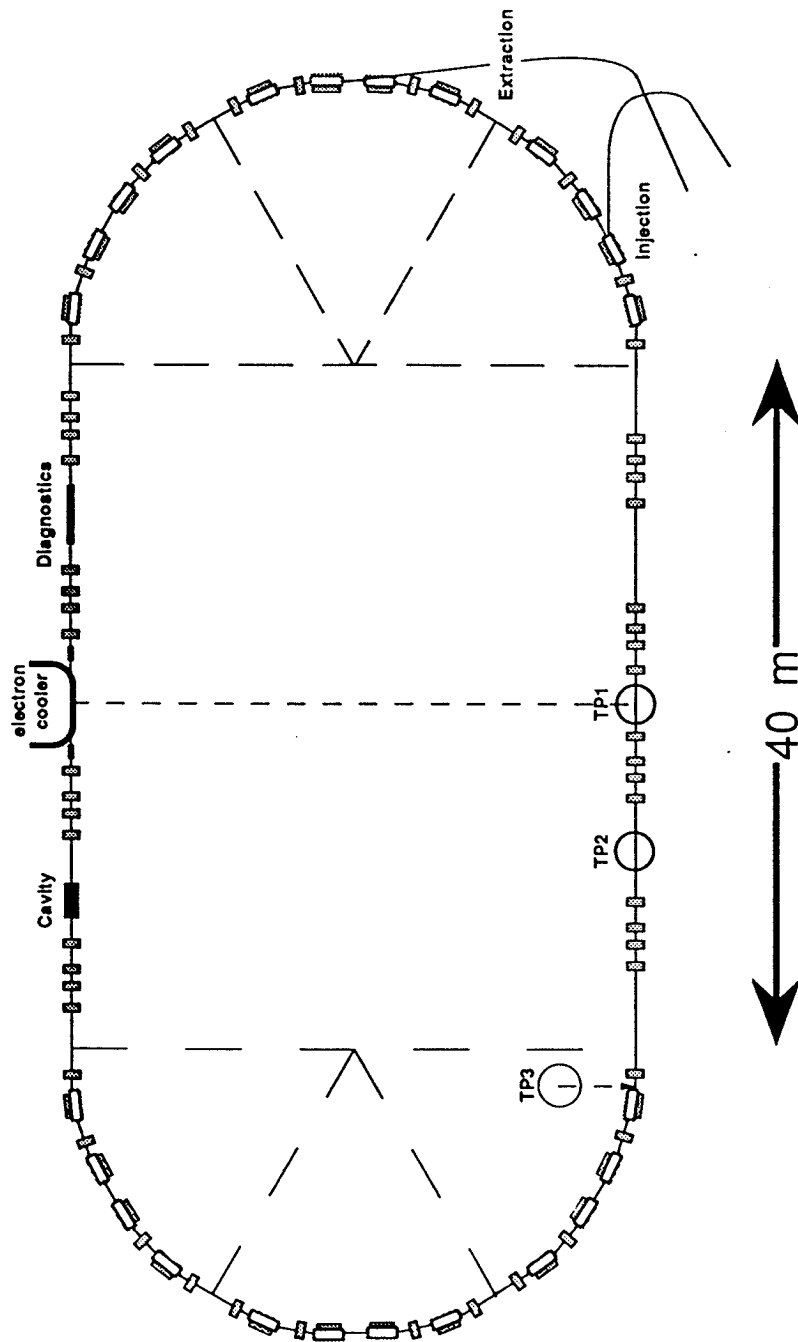


Abbildung 1.1: COSY

COSY ist für einen Betrieb mit Protonen und später auch leichten Ionen bis Ne^{20} ausgelegt. Sie werden von der ECR-Ionenquelle **ISIS** gespendet. Das vorhandene Isochron-Zyklotron **JULIC** kommt als Injektor zum Einsatz. Es übernimmt die Aufgabe, Ionen auf eine Injektionsenergie von 40 MeV zu beschleunigen. Unmittelbar vor der Injektion in den Speicherring werden Protonen durch Umladung von H_2^+ an einer Umladefolie erzeugt. In seiner Funktion als Synchrotron beschleunigt COSY die Protonen auf eine wählbare Endenergie von maximal 2,5 GeV. Anschließend wird der Protonenstrahl im Speicherbetrieb auf seiner Sollbahn gehalten und steht für Experimente an internen und externen Targets zur Verfügung.

Eine hohe Phasenraumdicke des Teilchenstrahls läßt sich nur durch Phasenraumkühlung erzielen. Im Energiebereich von 40 MeV bis 180 MeV wird dies durch Einsatz eines Elektronenkühlers erreicht. Ein kalter, gut gebündelter Elektronenstrahl wird in den Protonenstrahl eingeschleust und nach einer gewissen Laufstrecke wieder extrahiert. Durch Coulombstöße kann die Driftbewegung der Protonen reduziert werden.

Bei höheren Energien verwendet man stochastische Kühlung. Hierbei werden Abweichungen des Teilchenstrahls von der Sollbahn gemessen. Diese Information wird über Signalleitungen einem diametral gegenüberliegenden Punkt des Speicherrings übermittelt. Mit Hilfe von Kickermagneten kann dann eine entsprechende Korrektur, die den Teilchenstrahl auf seine Umlaufbahn zurückdrängt, vorgenommen werden.

1.2 Magnete für COSY

Für eine exakte Strahlführung des Ionenstrahls im Speicherring ist eine Vielzahl von Magneten erforderlich. Die Fokussierung des Ionenstrahls geschieht durch den Einbau von insgesamt 56 Quadrupolen und 20 Sextupolen sowohl in den geraden als auch gekrümmten Sektionen des Speicherrings. In den Kreisbögen zwingen insgesamt 24 Dipole mit einem Ablenkwinkel von je 15° den Strahl auf eine geschlossene Umlaufbahn. Im homogenen Feldbereich eines Dipolmagneten läuft der Ionenstrahl aufgrund der Lorentzkraft auf einer Kreisbahn.

Die Dipole sind rechteckige Elektromagneten mit C-förmigen Querschnitt (vgl. Abb 1.2). Zwei rechteckige Hauptspulen umwickeln die Polschuhe des Magneten und erzeugen bei maximalem Erregerstrom von etwa 4000 A eine Induktion von 1,58 T. Die 16 Wicklungen einer Hauptspule bestehen aus hohlen Kupferrohren quadratischen Querschnitts und werden mit Wasser gekühlt. Die Windungen sind gegeneinander isoliert

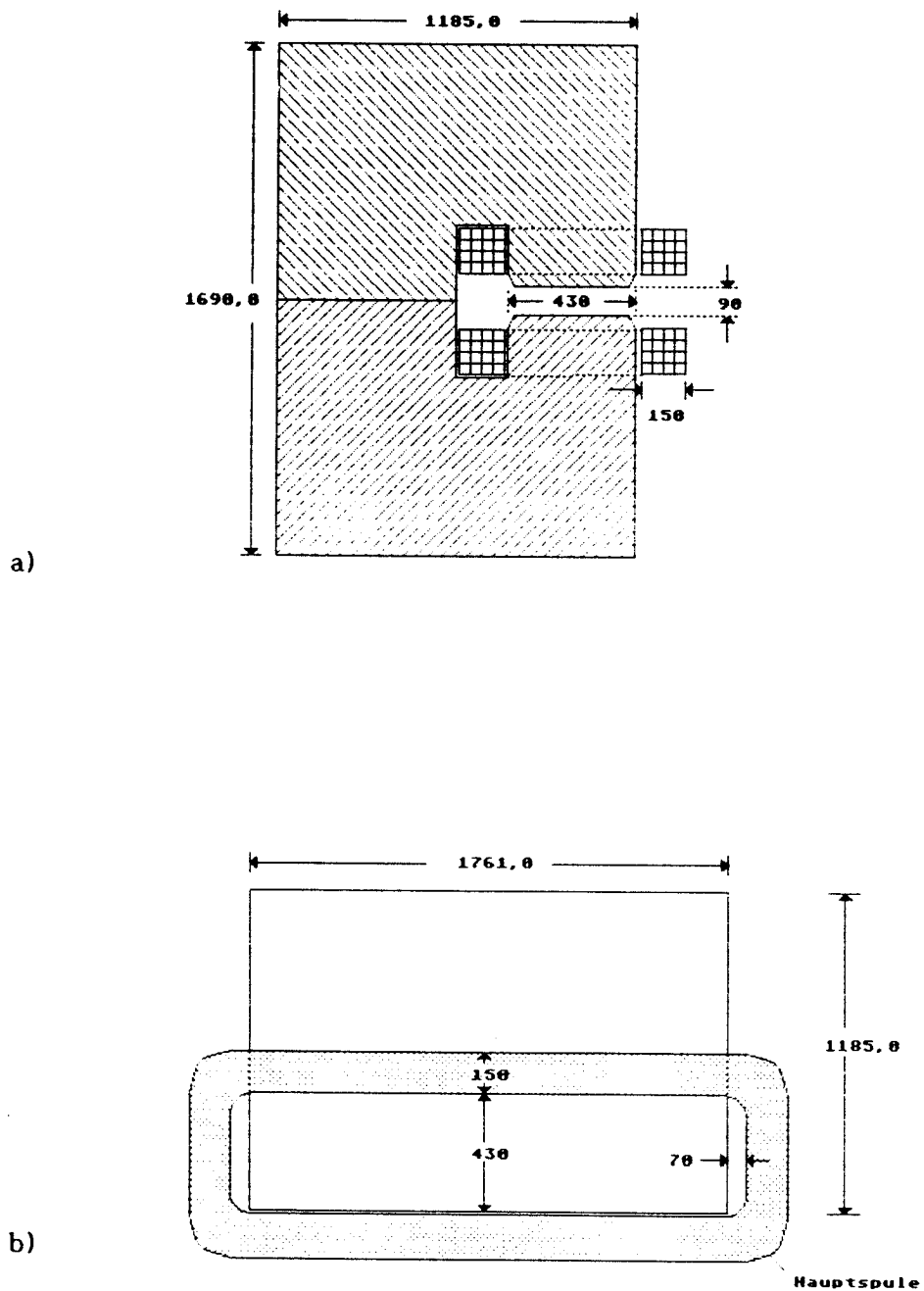


Abbildung 1.2: Geometrie eines COSY-Dipols. a) Seitenansicht, b) Draufsicht

und in Epoxidharz eingegegossen [EPAC 88].

Zur Vermeidung von Wirbelströmen bei einem dynamischen Betrieb des Dipols ist sein Eisenjoch aus etwa 1 mm starken, gegeneinander isolierten Blechen aufgebaut. Die Endblöcke der Polschuhe werden von Schrauben gehalten. Somit wird das Einfügen von Shimblechen ermöglicht, die eine Feinanpassung der magnetischen Länge eines Dipols an einen als Referenzdipol ausgezeichneten Dipol gestatten. Dies ist aufgrund der geforderten Identität aller Dipole bzgl. ihrer magnetischen Eigenschaften und der unvermeidbaren Fertigungstoleranzen unbedingt erforderlich.

1.3 Aufgabenstellung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme einer Dipolfeldmeßmaschine. Mit ihrer Hilfe sollen folgende Aufgaben gelöst werden:

- Statische Vermessung aller Feldkomponenten der magnetischen Induktion $\mathbf{B}$ im gesamten Feldbereich (homogener Feldbereich & Streufeldbereich)
- Ermittlung der relativen Feldverteilung des Gesamtfeldes und aller Feldkomponenten
- Bestimmung der Ablenkstärke $\int B dl$
- Darstellung der effektiven Länge l_{eff} des Magneten
- Harmonische Analyse der gemessenen Feldverteilung

Die primäre Funktion dieser Feldmeßmaschine besteht in der Erstellung einer Feldkarte eines COSY-Dipols. Darunter verstehen wir die punktweise Vermessung aller Feldkomponenten der magnetischen Induktion $\mathbf{B}$ im gesamten Feldbereich.

Die Motivation für den Aufbau einer derartigen Feldmeßmaschine leitet sich aus dem Wunsch ab, genaue Kenntnis über den Verlauf des Magnetfeldes insbesondere im Streufeldbereich zu besitzen. Mit Hilfe der gewonnenen Meßdaten lassen sich dann Raytrace-Rechnungen durchführen, die die Trajektorie eines geladenen Teilchens im gemessenen Magnetfeld ermitteln. Im Mittelpunkt des Interesses steht dabei derjenige Dipol, der sich an der Stelle

des Anschlusses der Injektionsstrahlführung an den Speicherring COSY befindet. Hier legt der injizierte Ionenstrahl einen relativ langen Weg durch den Streufeldbereich des Magneten zurück.

Aufgrund der Vielzahl von zu vermessenden Raumpunkten ist ein rechnergesteuerter Betrieb der Feldmeßmaschine unbedingt erforderlich. Der Rechner ermöglicht sowohl die Vorbereitung und Durchführung der Messung als auch die Verwaltung und Auswertung der Messdaten. Um auch Mitarbeitern anderer Forschungsinstitute die Bedienung der Feldmeßmaschine zu ermöglichen, ist ein menügesteuerter Betrieb aller Funktionen unerlässlich.

1.4 Kapitelübersicht

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über den thematischen Inhalt der Kapitel dieser Arbeit.

Das Kapitel 2 „Theoretische Grundlagen“ befaßt sich mit dem physikalischen Hintergrund der Feldmessung. Die wichtigsten Grundgesetze der Magnetostatik werden kurz beschrieben. Eine vereinfachte Darstellung der Theorie der Meßmethode ist mit in dieses Kapitel aufgenommen. Es dient im wesentlichen der Erläuterung von Begriffen der Magnettechnologie, sofern sie für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind.

Im Kapitel 3 „Meßaufbau“ findet der Leser eine detaillierte Beschreibung der Komponenten der Feldmeßmaschine.

Das Kapitel 4 „Programmgesteuerter Betrieb der Feldmeßmaschine“ nimmt einerseits Bezug auf die Funktionsweise der Feldmeßmaschine, welche durch das Steuerprogramm **hall** bestimmt ist. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Formen der Auswertung eingegangen, die im Steuerprogramm mit vorgesehen sind. Andererseits enthält dieses Kapitel Hintergrundinformationen über die Erstellung des Steuerprogramms. Daraus leiten sich insgesamt wichtige Hinweise für die Bedienung der Feldmeßmaschine ab.

Das Thema „Meßgenauigkeit und Meßergebnisse“ wird in Kapitel 5 behandelt. Mögliche Fehlerquellen der Messung werden aufgezeigt und ihre Auswirkung auf die zu bestimmenden Kenndaten untersucht. Die Ergebnisse einer Feldkartenmessung eines COSY-Dipols bei einem hohen Erregungsstrom zeigen einerseits die Grenzen der Güte des Dipols auf und lassen andererseits den Einfluß der Fehlerquellen auf die Meßergebnisse deutlich

hervortreten.

Der in Kapitel 6 befindliche Anhang fasst wichtige Parameterdaten der Feldmeßmaschine zusammen, die die Grundlage für einen fehlerfreien Betrieb bilden.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden einige grundlegende Begriffe aus der Terminologie der Ionenoptik erläutert, insofern sie für das Verständnis der vorliegenden Arbeit von Nutzen sind. Die physikalischen Eigenschaften strahlführender Magnete sollen kurz beleuchtet werden. Im folgenden werden vektorielle Größen durch Fettdruck hervorgehoben, ihre Beträge hingegen erscheinen in Normaldruck.

2.1 Grundgleichungen der Magnetostatik

Die Grundgleichungen der Magnetostatik beschreiben die räumliche Verteilung magnetischer Felder aufgrund einer vorgegebenen stationären Stromverteilung. Sie stellen einen Spezialfall der Maxwellgleichungen dar und lauten in differenzieller Form im rationalen MKSA-Einheitensystem

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (2.2)$$

Hierbei bedeutet $\mathbf{B}$ die magnetische Induktion oder Kraftflußdichte, $\mathbf{H}$ die magnetische Feldstärke und $\mathbf{j}$ eine stationäre Stromdichteverteilung. Während die magnetische Feldstärke $\mathbf{H}$ unmittelbar durch die makroskopische Stromdichte $\mathbf{j}$ festgelegt wird, berücksichtigt die magnetische Induktion $\mathbf{B}$ die Existenz atomarer Kreisströme und magnetischer Momente bei Anwesenheit ausgedehnter Materie. Diese Tatsache wird durch die makroskopische Magnetisierung $\mathbf{M}$ beschrieben, welche die Feldgrößen $\mathbf{B}$ und $\mathbf{H}$

in der Materialgleichung

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) & \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} & (2.3) \\ \text{bzw. } \mathbf{B} &= \mu\mu_0\mathbf{H} \end{aligned}$$

miteinander verknüpft. Die Permeabilität μ stellt für anisotrope Medien einen Tensor dar, welcher vom betrachteten Material und der Stärke und Richtung der Feldstärke $\mathbf{H}$ abhängt.

2.2 Hysterese

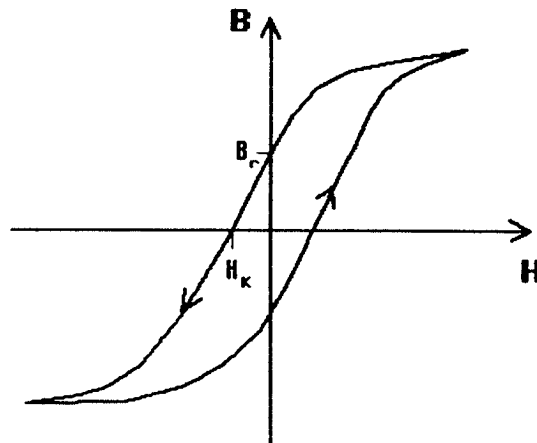


Abbildung 2.1: Hysteresekurve eines Ferromagnetikums

Bei ferromagnetischen Medien besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke $\mathbf{H}$ und Induktion $\mathbf{B}$. Die Änderung der Induktion hängt nicht nur von der Änderung der Feldstärke sondern auch vom Wert der Magnetisierung zu Beginn dieser Änderung ab. Die Abbildung 2.1 zeigt den Verlauf der Induktion, wenn die Feldstärke zwischen Werten variiert, bei denen die Magnetisierung ihre Sättigung erreicht. Man bezeichnet diese Kurve als **Hysteresekurve**. Bei Abnahme der Feldstärke von ih-

rem positiven Sättigungswert auf $H = 0$ verbleibt ein **Remanenzfeld** B_r , welches erst wieder bei der **Koerzitivkraft** H_k verschwindet.

Zwar zeichnen sich die COSY-Dipole durch eine geringe Koerzitivkraft aus, jedoch ist es für eine reproduzierbare Feldmessung erforderlich, eine bestimmte Stromreihenfolge für die Einstellung eines Feldwertes zu befolgen.

2.3 Koordinatensysteme

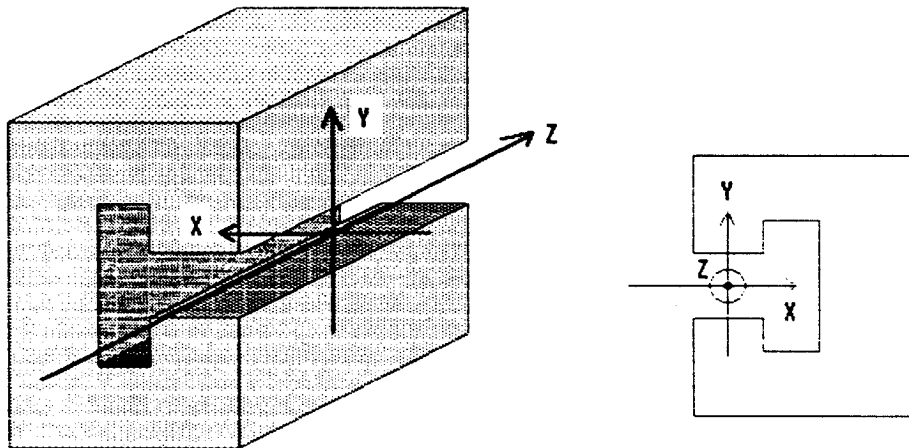


Abbildung 2.2: Definition des kartesischen Magnet-Koordinaten-Systems

Für die Strahlführung eines Teilchenstrahls in einem Speicherring benutzt man rotationssymmetrisch gebaute Multipolmagnete. Die Symmetrieachse dieser Magnete fällt mit der Strahlrichtung der Teilchen zusammen und wird üblicherweise als z -Achse definiert. Aufgrund der Drehsymmetrie um die z -Achse erfolgt eine Beschreibung magnetischer Felder und ihrer Potentiale zweckmäßigerweise in Zylinderkoordinaten. Die Tatsache, daß sich ein idealer $2l$ -poliger Magnet ($l = 1$ Dipol, $l = 2$ Quadrupol, $l = 3$ Sextupol, usw.) bei einer Drehung von $\frac{\pi}{l}$ um die z -Achse bis auf seine Polarität reproduziert, kann dann leicht für theoretische Überlegungen ausgenutzt werden.

Die Geometrie eines Dipols wird zusätzlich auch gerne in kartesischen

Koordinaten betrachtet. Die Einführung eines derartigen Koordinatensystems hat sich im Verlauf der vorliegenden Arbeit aufgrund messtechnischer Gegebenheiten als zweckmäßig erwiesen. Es soll im folgenden als **Magnet-Koordinaten-System (MKS-System)** bezeichnet werden. Sein Ursprung befindet sich in der geometrischen Mitte des Dipols, während die Achsen x , y und z die in Abbildung 2.2 gezeigte Richtung besitzen.

2.4 Potentiale und Multipolentwicklung

Aufgrund des komplizierten Zusammenhangs zwischen $\mathbf{B}$ und $\mathbf{H}$ in der Materialgleichung (2.3) ist eine Lösung der Grundgleichungen der Magnetostatik i.a. schwierig. Sind die Felder $\mathbf{B}$ und $\mathbf{H}$ jedoch kollinear und ist die Permeabilität μ wenigstens stückweise konstant [Jack 83], so gilt aufgrund von (2.2) für die magnetische Induktion die Beziehung

$$\text{rot}\mathbf{B} = \text{rot}(\mu\mu_0\mathbf{H}) = \mu\mu_0\mathbf{j} \quad (2.4)$$

Da die Divergenzfreiheit der magnetischen Induktion stets erfüllt ist, kann sie immer als Rotation eines Vektorpotentials $\mathbf{A}$ dargestellt werden.

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A} \quad (2.5)$$

Das Vektorpotential $\mathbf{A}$ genügt dann in Coulombbeziehung ($\text{div}\mathbf{A} = 0$) der Poissongleichung

$$\Delta\mathbf{A} = \text{grad div}\mathbf{A} - \text{rot rot}\mathbf{A} = -\text{rot}\mathbf{B} = -\mu\mu_0\mathbf{j} \quad (2.6)$$

Der für eine Beeinflussung geladener Teilchenstrahlen wichtige Raumbereich liegt zwischen den Polschuhen eines Magneten, wo die Stromdichte $\mathbf{j}$ verschwindet. Einerseits reduziert sich (2.6) in diesem Bereich auf eine Laplacegleichung für das Vektorpotential

$$\Delta\mathbf{A} = 0 \quad (2.7)$$

Andererseits verschwindet nun auch die rechte Seite von (2.4). Dies ermöglicht die alternative Beschreibung der magnetischen Induktion durch ein skalares magnetisches Potential Φ mit

$$\mathbf{B} = \text{grad}\Phi \quad (2.8)$$

Ferner gilt für das Skalarpotential Φ ebenfalls die Laplacegleichung

$$\Delta\Phi = \text{div grad}\Phi = \text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (2.9)$$

Wir nutzen den Vorteil der Beschreibung von $\mathbf{B}$ durch eine einzige skalare Funktion Φ und betrachten die Lösung der Laplacegleichung (2.9) in Zylindergeometrie. Dann lautet (2.9) ausführlich

$$\left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} \Phi(r, \varphi, z) = 0 \quad (2.10)$$

und ihre Lösungen können vermöge eines Separationsansatzes für die Variablen r, φ und z in der Form

$$\Phi(r, \varphi, z) = R(r)W(\varphi)Z(z) \quad \text{mit} \quad (2.11)$$

$$R(r) = AJ_n(kr) + BN_n(kr)$$

$$W(\varphi) = C \sin(n\varphi) + D \cos(n\varphi)$$

$$Z(z) = E \sinh(kz) + F \cosh(kz)$$

angegeben werden [Jack 83]. Hierin bedeuten J_n und N_n die Bessel- und Neumannsche Funktion n -ter Ordnung. Verlangt man die Endlichkeit des Potentials bei $r = 0$, so muß $B = 0$ gelten, da die Neumannsche Funktion für $\lim_{r \rightarrow 0}$ divergiert. Die Forderung der Eindeutigkeit von Φ bedeutet, daß $n \in \mathcal{N}$ eine ganze Zahl sein muß.

Die formale Gestalt der Lösung (2.11) kann durch Symmetriebetrachtungen weiter eingeschränkt werden. Besitzt der Magnet eine Mittelebenensymmetrie (d.h. $\Phi(r, \varphi, z) = -\Phi(r, \varphi, z)$), so folgt, daß die Winkelabhängigkeit des Potentials nur aus ungeraden Funktionen besteht (d.h. $D = 0$) [Brown 65]. Damit reduziert sich die Lösung (2.11) insgesamt auf

$$\Phi(r, \varphi, z) = \sum_{i=0}^{\infty} c_n(z) \sin(n\varphi) J_n(kr) \quad (2.12)$$

wenn man die z -Abhängigkeit mit in die Entwicklungskoeffizienten c_n aufnimmt. Man bezeichnet diese Koeffizienten auch als **Multipolkoeffizienten**. Sie stellen die Beiträge der einzelnen harmonischen Komponenten zum Gesamtfeld dar ($n = 1$ Dipolanteil, $n = 2$ Quadrupolanteil, $n = 3$ Sextupolanteil). Für die Komponenten der magnetischen Induktion gilt dann wegen $\mathbf{B} = \text{grad}\Phi$

$$\begin{aligned} B_r &= \sum_{n=0}^{\infty} c_n(z) \sin(n\varphi) \frac{d}{dr} J_n(kr) \\ B_\varphi &= \sum_{n=0}^{\infty} c_n(z) n \cos(n\varphi) J_n(kr) \\ B_z &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d}{dz} c_n(z) \sin(n\varphi) J_n(kr) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Als Konsequenz aus der Mittelebenensymmetrie ergibt sich, daß die transversalen Komponenten B_r und B_z in der Mittelebene ($\varphi = 0$ bzw. $\varphi = \pi$) verschwinden. Die magnetische Induktion besitzt dort nur eine Komponente senkrecht zur Mittelebene.

Wie bereits erwähnt reproduziert sich ein $2l$ -poliger Magnet bei einer Drehung von $\frac{\pi}{l}$ um die z -Achse bis auf seine Polarität. Ist diese Drehsymmetrie vorhanden, so muß das Potential Φ der Bedingung

$$\Phi(r, \varphi, z) = -\Phi(r, \varphi + \frac{\pi}{l}, z) \quad (2.14)$$

genügen. Daraus folgt unmittelbar, daß n nur die Werte $n = (2\nu + 1)l$ mit $\nu \in \mathcal{N}$ annehmen kann. Die erlaubten harmonischen Anteile eines Dipolmagneten ($l = 1$) mit dieser Drehsymmetrie besteht daher nur aus Koeffizienten c_n mit ungeradem n , also nur aus Dipol-, Sextupol, Dekapolanteil, ...

Die asymmetrische Bauweise eines COSY-Dipols mit einseitigem Rückflußjoch weist die genannte Drehsymmetrie nur annähernd auf. Daher erwartet man bei einer Feldmessung auch das Auftreten der ansonsten verbotenen harmonischen Anteile. Die relative Größe dieser Koeffizienten mag als Maß für die Asymmetrie des Magneten dienen.

Ferner gestattet die Messung der transversalen Komponenten der Induktion $\mathbf{B}$ in der Mittelebene eine Aussage, inwiefern die Mittelebenensymmetrie ausgeprägt ist. Dies ist u.a. ein entscheidendes Kriterium für

die ionenoptische Qualität eines Ablenkmagneten, da transversale Feldkomponenten den Teilchenstrahl aus der Mittelebene ablenken und diesen somit von der Sollbahn fortführen.

2.5 Grundbegriffe der Ionenoptik eines Dipols

Die Dynamik geladener Teilchen in einem elektromagnetischen Feld wird durch die Lorentzkraft

$$\mathbf{F} = q\{\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}\} \quad (2.15)$$

bestimmt. Darin bedeutet q die Ladung des Teilchens, welches sich mit der Geschwindigkeit $\mathbf{v}$ bewegt. In einem reinen, homogenen Magnetfeld $\mathbf{B}$ erfolgt die Bewegung auf einer Kreisbahn in einer Ebene, auf welcher das Feld senkrecht steht. Für den Radius r der Kreisbahn gilt aufgrund des Kräftegleichgewichts zwischen Lorentzkraft und Zentrifugalkraft

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad \text{bzw.} \quad Br = \frac{p}{q} \quad (2.16)$$

Das Produkt Br bezeichnet man auch als **Strahlsteifigkeit**. Es hängt lediglich von der Ladung q und dem Impuls p des Teilchens ab. Betrachten wir nun die Bewegung eines geladenen Teilchens durch das Feld eines Magneten, welcher Mittelebenensymmetrie besitzen möge. Dies bedeutet nach den Ausführungen des vorigen Abschnitts, daß das Magnetfeld nur eine Komponente senkrecht zu dieser Ebene besitzt. Es sei ferner das Magnetfeld nur in dem durch die Kurve S umrandeten Bereich von Null verschieden (vgl. Abbildung 2.3). Dann erfolgt die Bewegung im feldfreien Gebiet auf Geraden, während sie im Feldbereich gekrümmt ist.

Der **Ablenkwinkel** α zwischen den Geraden hängt von der Feldverteilung entlang der Teilcentrajektorie ab. Entlang des Bahnelements dl kann die Feldverteilung als konstant betrachtet werden. Das Bahnelement dl stellt aufgrund der Lorentzkraft einen infinitesimalen Kreisbogen dar. Das Teilchen wird beim Passieren der Strecke dl daher um den Winkel

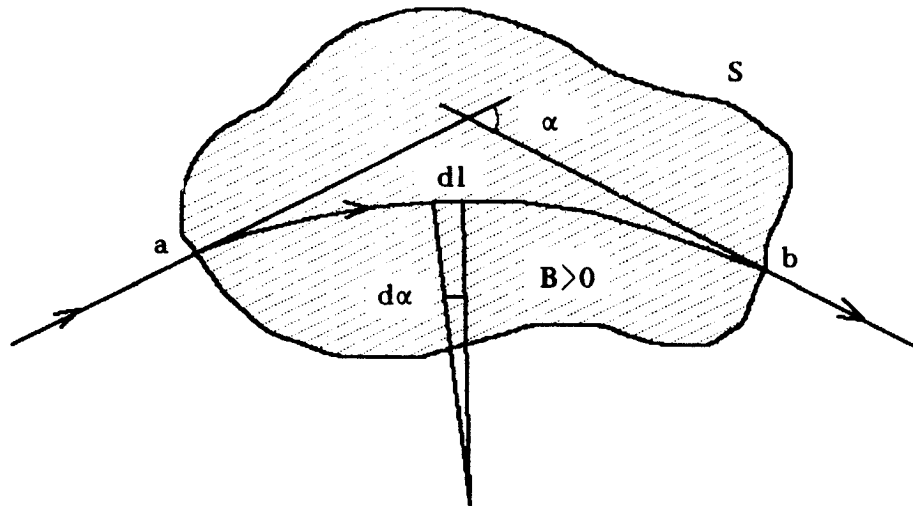


Abbildung 2.3: Ablenkung eines geladenen Teilchens in einem Feld mit Mittelebenensymmetrie

$$d\alpha = \frac{dl}{r(l)} \quad (2.17)$$

abgelenkt, wobei $r(l)$ der Radius des Krümmungskreises im betrachteten Bahnpunkt bedeutet. Unter Berücksichtigung von (2.16) ergibt sich für den Ablenkwinkel α sofort

$$d\alpha = \frac{p}{q} B dl \quad \text{bzw.} \quad \alpha = \frac{p}{q} \int_b^a B dl \quad (2.18)$$

Das Integral $\int B dl$ wird als **Ablenkstärke** bezeichnet. Die Integration erstreckt sich über den gesamten Feldbereich. Entscheidend für den Ablenkwinkel α ist also nicht die individuelle Feldverteilung entlang der Strahlrichtung, sondern vielmehr das Integral über die Feldverteilung. Diese Tatsache wird genutzt, um die wahre Feldverteilung in Strahlrichtung des Magneten durch eine rechteckförmige Modellfeldverteilung gleicher Ablenkstärke zu ersetzen (vgl. Abbildung 2.4). Dies führt unmittelbar zur Definition einer effektiven Länge l_{eff} des Magneten mit

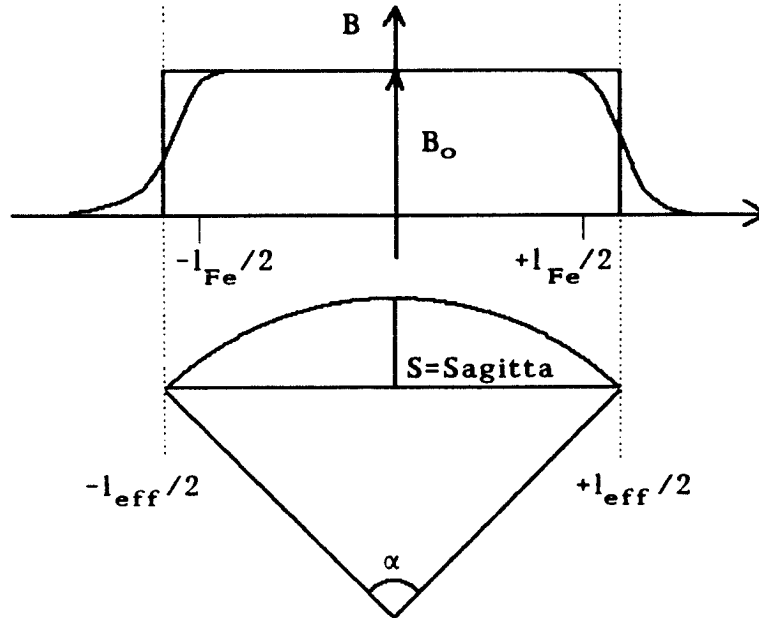


Abbildung 2.4: Annäherung der realen Feldverteilung durch eine rechteckige Feldverteilung und Definition des Sagitta

$$l_{eff} = \frac{\int B dl}{B_0} \quad (2.19)$$

wobei B_0 der Feldwert in der Mitte des Magneten bei $z = 0$ bedeutet. Die Bahnbewegung durch eine derartige Modellfeldverteilung erfolgt wie bereits mehrfach erwähnt auf einem Kreisbogen. Der maximale Abstand zwischen der Sekante und dem Kreisbogen trägt den Namen **Sagitta**. Er berechnet sich bei gegebenem Ablenkwinkel α und Ablenkradius R zu

$$S = R(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \quad (2.20)$$

Im Falle eines COSY-Dipols besitzt S mit $\alpha = 15^\circ$ und $R = 7$ m den Wert $S = 60$ mm. Im nutzbaren Feldbereich des Dipols unterscheiden sich die Feldverteilungen in z -Richtung für benachbarte Werte der x -Koordinate nur unwesentlich. Die Ablenkstärke und damit die effektive Länge kann dann näherungsweise durch eine Integration der y -Komponente des Feldes entlang der Strahlrichtung z dargestellt werden.

2.6 Halleffekt

Ein stromdurchflossener Leiter befindet sich in einem Magnetfeld der Induktion B . Als Halleffekt bezeichnet man den dann auftretenden Spannungsabfall U (sog. **Hallspannung**) in einer Richtung senkrecht zur Feld- und Stromrichtung.

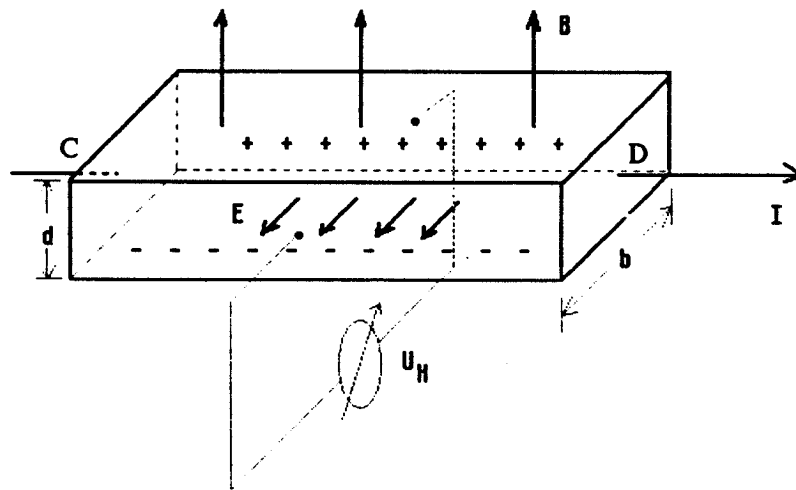


Abbildung 2.5: Hallspannung zwischen den Seitenflächen eines rechteckförmigen, stromdurchflossenen Leiters bei Anwesenheit eines B -Feldes. Die Ladungsverschiebung ist für den Fall negativer Ladungsträger gezeichnet.

Zur Erläuterung des Halleffekts betrachten wir den in Abbildung 2.5 dargestellten Leiter rechteckförmigen Querschnitts. Bei Anlegen einer Spannung V zwischen den Punkten C und D resultiert in dieser Richtung ein Strom I . Die Ladungsträger bewegen sich aufgrund von Stößen mit den Atomen des Leitermaterials mit einer mittleren Driftgeschwindigkeit v_D . Bezeichnet q die Ladung und n die Dichte der Ladungsträger, so gilt für die Stromdichte der Zusammenhang

$$j = nqv_D \quad (2.21)$$

Bei Einschalten des Magnetfeldes B werden die Ladungsträger aufgrund der Lorentzkraft in einer Richtung senkrecht zu j und B abgelenkt. Dies

führt zu einer Akkumulation von Ladungsträgern an den seitlichen Begrenzungsflächen des Leiters und zum Aufbau eines elektrischen Feldes $\mathbf{E}$ in der betrachteten Richtung. Im stationären Zustand kompensiert die resultierende elektrische Feldkraft gerade die Lorentzkraft und es findet keine weitere Ladungsträgerverschiebung mehr statt. Dann gilt

$$F_{el} = qE = F_{Lorentz} = qv_D B \quad (2.22)$$

Unter Verwendung von (2.20) erhält man daher unmittelbar als Ergebnis für die Hallspannung U_H

$$U_H = bE = bv_D B = b \frac{j}{nq} v_D B = \frac{I}{nqd} B = R_H \frac{IB}{d} \quad (2.23)$$

Die Größe R_H wird als Hallkonstante bezeichnet. Die lineare Beziehung zwischen Hallspannung und magnetischer Induktion basiert auf der klassischen Modellvorstellung frei beweglicher Ladungsträger. Zwar beschreibt (2.22) das Verhalten einer Reihe von metallischen Leitern und Halbleitern in erster Näherung recht gut, jedoch weist die Hallkonstante bei genauerer Betrachtung sowohl Feld- als auch Temperaturabhängigkeit auf. Eine exakte Formulierung dieser Beziehung kann nur aufgrund einer quantenmechanischen Betrachtung des Ladungstransports erfolgen. Während in metallischen Leitern die Elektronen die Ladungsträger darstellen, kommen in Halbleitern sowohl Elektronen als auch die sog. Löcherleitung für den Ladungstransport in Frage. Welcher der beiden Leitungsmechanismen die Majorität der Ladungsträger stellt, hängt von der Dotierung des Halbleitermaterials ab. Die Hallkonstante kann demzufolge unterschiedliches Vorzeichen besitzen.

Bei Verwendung einer Hallsonde zur Vermessung magnetischer Felder darf die Feld- und Temperaturabhängigkeit nicht außer Acht gelassen werden. Aus diesem Grund ist eine individuelle Kalibrierung einer jeden Hallsonde im gesamten, zu vermessenden Feldbereich erforderlich. Die Kalibrierung erfolgt bei einem bestimmten Strom I und bei fest vorgegebener Eichtemperatur T_e . Die Eichdaten können dann mittels einer Polynom Anpassung sehr gut dargestellt werden. Das Polynom gestattet dann die Berechnung eines Feldwertes aufgrund der gemessenen Hallspannung.

Für Feldwerte in der Größe von 1 Tesla sind Hallspannungen in der Größenordnung 10 mV erreichbar, da die Schichtdicke d der Hallsonde (vgl. 2.22) sehr dünn (ca. 0,1 mm) hergestellt werden kann. Durch die insgesamt geringen Abmessungen einer Hallsonde lassen sich hohe Ortsauflösungen bei der Feldmessung erzielen. Dieser Umstand ist insbesondere

in Feldbereichen mit großen Feldgradienten – d.h im Streufeldbereich eines Magneten – von großem Vorteil.

Andere gängige Feldmeßverfahren wie die Verwendung einer Feldmeßspule oder eines NMR-Magnetometers erreichen infolge ihrer größeren Abmessungen nicht die Ortsauflösung einer Hallsonde [Deck 89]. Hingegen ist die absolute Meßgenauigkeit einer Hallsonde auf etwa 10^{-4} Tesla beschränkt. Dies wirkt sich auf die relative Meßgenauigkeit bei Feldern kleiner als 0,1 Tesla nachteilig aus. In dieser Beziehung sind die genannten Feldmeßverfahren der Hallsonde überlegen.

Kapitel 3

Meßaufbau

Dieses Kapitel beschreibt den apparativen Aufbau einer Dipolfeldmeßmaschine, mit deren Hilfe die in Abschnitt 1.3 genannten Meßaufgaben gelöst werden.

3.1 Die Feldmeßmaschine - ein Überblick

Die Feldmeßmaschine gliedert sich in drei Funktionseinheiten. Sie besteht erstens aus einer Apparatur zur Positionierung einer Meßsonde an eine beliebige Stelle des Meßobjekts. Hierzu zählen der 3-Achsen-Meßtisch einschließlich der hieran montierten Meßsondenhalterung, eine elektronische Tischsteuerung zur Bewegung der Tischachsen und eine Fahrmimik, mit deren Hilfe der Meßtisch insgesamt auf definierte Meßtischpositionen gesetzt werden kann.

Den zweiten Bestandteil bildet die Apparatur zur Messung des Magnetfeldes. Sie setzt sich aus drei wahlweise einsetzbaren Meßsonden zusammen, welche jeweils drei paarweise zueinander senkrecht angeordnete Hallsonden tragen. Wir bezeichnen eine Meßsonde daher auch als Hallsondenträger.

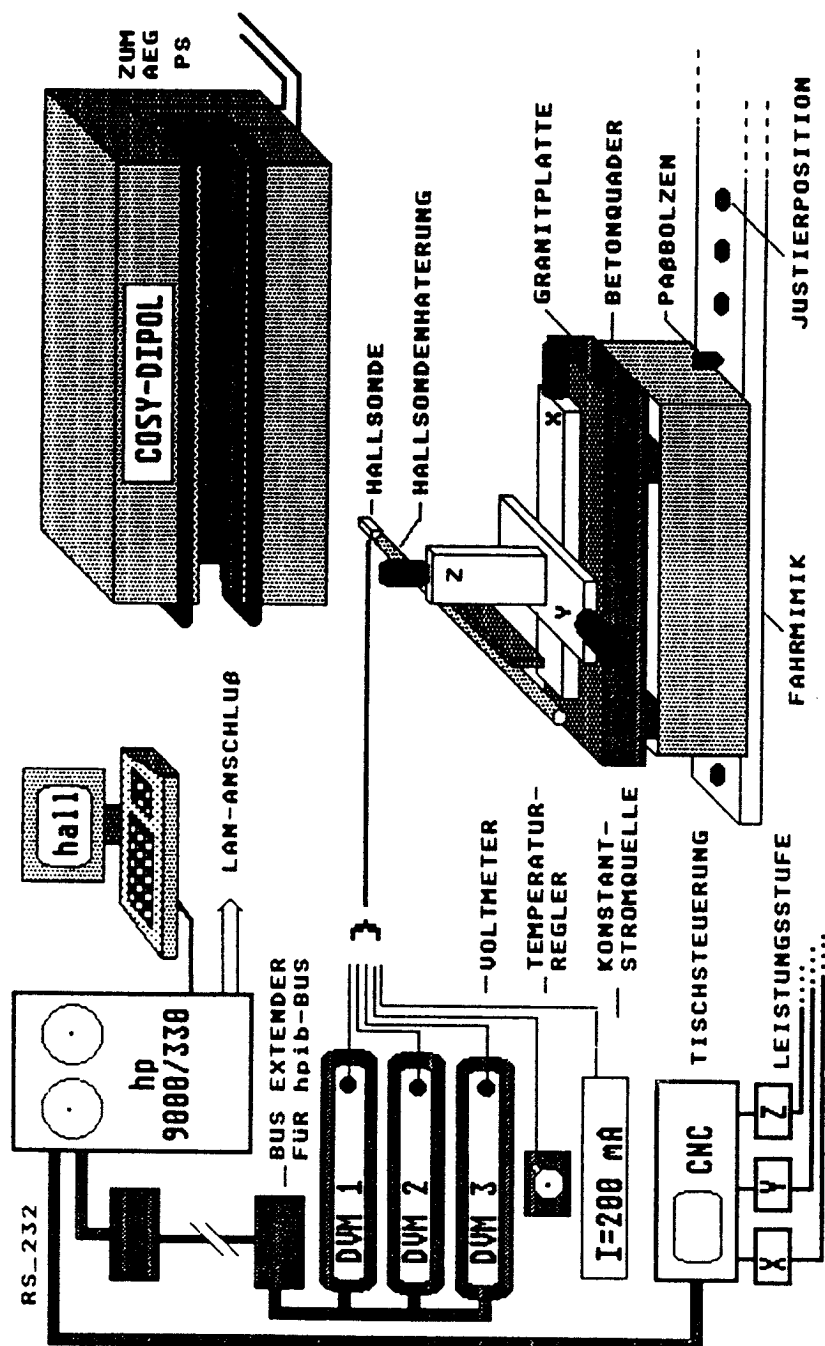


Abbildung 3.1: Komponenten der Feldmeßmaschine

Da temperaturstabilisierte Hallsonden verwendet werden, gehört zu dieser Funktionsgruppe von Geräten ein Regler, der die Hallsonden auf konstanter Temperatur hält. Ferner werden für eine Messung der Hallspannung und Zwischenspeicherung der Meßergebnisse drei Digitalvoltmeter eingesetzt.

Die dritte Funktionseinheit der Feldmeßmaschine bildet ein Rechner der Firma Hewlett Packard aus der Serie 9000/330. Er besitzt mehrere Schnittstellen für die Kommunikation mit extern angeschlossenen Geräten und ist außerdem über ein lokales Netzwerk LAN (Local Area Network) mit anderen Rechnern verbunden. Auf der Daten-Festplatte dieses Rechners ist das Programm *hall* installiert, welches die Bedienung der Feldmeßmaschine ermöglicht. Darunter verstehen wir die Ansteuerung der Positioniervorrichtung über eine RS232-Schnittstelle und der Digitalvoltmeter über eine IEEE-488 Schnittstelle (*hpib-bus*) sowie die Auswertung und Verwaltung gewonnener Meßdaten. Da die Positionier- und Meßapparatur ausschließlich im Fernsteuerungsmodus betrieben werden, spielt der Rechner als Kontrollorgan über diese beiden Funktionsgruppen eine übergeordnete Rolle. Die Abbildung 3.1 liefert einen Überblick über die Komponenten der Feldmeßmaschine.

3.2 Positioniervorrichtung

3.2.1 3-Achsen-Meßtisch

Der 3-Achsen-Meßtisch der Firma Franke aus Aalen bildet die mechanische Komponente der Positioniervorrichtung. Er besteht aus drei paarweise senkrecht zueinander angeordneten Achsen, welche mit 5-Phasen-Schrittmotoren der Firma Berger/Lahr angetrieben werden. Jede Tischachse besteht aus einer Spindel, deren Drehbewegung über Kugellager in eine Linearbewegung eines aufgesetzten Schlittens umgewandelt wird. In Abbildung 3.2 ist die Anordnung der Tischachsen dargestellt, welche im folgenden als *X*-, *Y*- und *Z*-Achse bezeichnet werden. Eine auf dem Schlitten der *Z*-Achse montierte Meßsondenhalterung läßt sich somit in allen drei Raumrichtungen verfahren.

Die maximalen Verfahrrwege der Tischachsen betragen für die *X*-Richtung 660 mm, für die *Y*-Richtung 220 mm und für die *Z*-Richtung 170 mm. Der Fahrbereich einer Tischachse wird an den Achsenden durch induktive Näherungsschalter begrenzt. Der Abschaltpunkt dieser Endschalter läßt sich mittels der Tischsteuerung in geringem Maße verändern. Jeweils einer

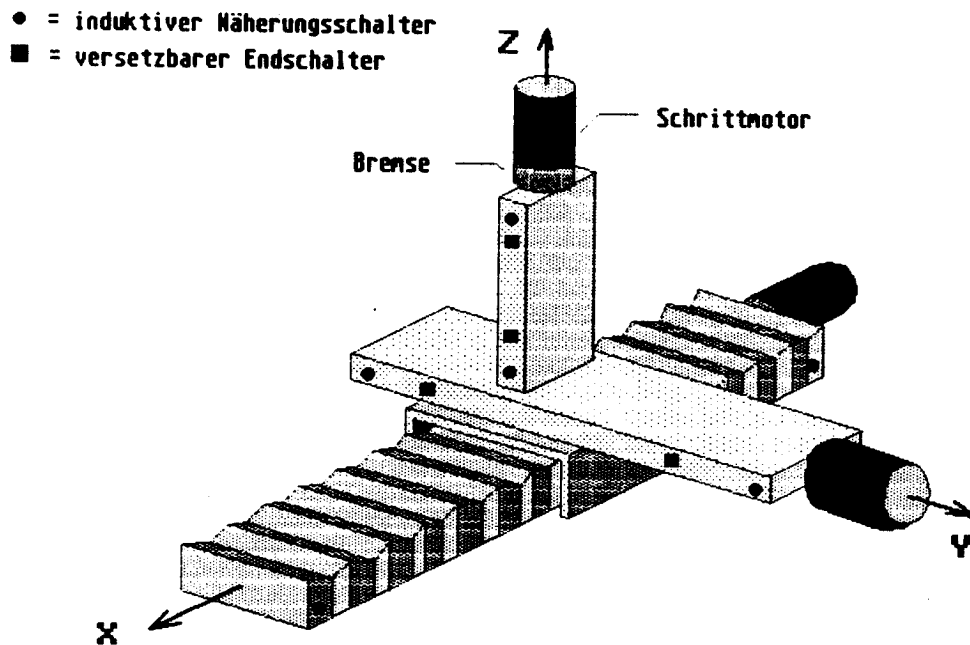


Abbildung 3.2: 3-Achsen-Meßtisch – Die Lage aller Endschalter und die positive Fahrriichtung aller Achsen sind dargestellt.

dieser Endschalter besitzt zusätzlich die Funktion eines Referenzschalters, welcher bei einem Referenzpunktsuchlauf des Meßtischs angefahren wird. Der Fahrbereich der Y- und Z-Achse des Meßtischs wird durch extern angebrachte Endschalter zusätzlich eingeschränkt. Werden sie angefahren, so unterbricht ein mechanischer Kontaktschalter die Stromzuführung der Leistungsendstufen der Schrittmotoren. Erst nach Überbrückung dieser Endschalter mittels Steckbrücken kann der Meßtisch wieder bewegt werden. Die zusätzlichen Endschalter erlauben die Anpassung der Fahrbereiche der betreffenden Achsen an die geometrischen Abmessungen des Magneten und verhindern somit eine Beschädigung der Meßsonde (vgl. Abbildung 3.1). Die Lage aller Endschalter ist ebenfalls in Abbildung 3.2 angedeutet.

Der Meßtisch ist seinerseits auf einer Granitplatte montiert. Sie ruht mit drei Justierfüßen auf einem mit Beton ausgegossenen Stahlgerüst. Die Justierfüße gestatten die horizontale Ausrichtung des Meßtischs, während der Betonquader Schwingungen bei Bewegung des Meßtischs minimiert [Hardt 85] [Schiff 85]. Die Positioniergenauigkeit liegt nach Herstellerangaben bei 0,01 mm und wurde mit einem Laserinterferrometer überprüft [Krol 90]. Jedoch wird diese Genauigkeit wegen des Umkehrspiels der Spindeln nur bei Positionierung aus dergleichen Fahrriichtung erreicht. Hingegen ist die Positioniergenauigkeit bei Anfahren desgleichen Punktes aus verschiedenen Richtungen besser als 0,1 mm und ist aufgrund der limitierten

Ortsauflösung der Hallsonde im vorliegenden Anwendungsfall ausreichend.

3.2.2 Tischsteuerung

Die Tischsteuerung gliedert sich in eine CNC-Steuerung (Computerized Numerical Control der Firma S+M Elektronik [S+M 88] und entsprechenden Leistungsendstufen für die Bewegung der Schrittmotoren. Es werden hierbei Bipolar-Chopper-Driver der Firma Midx eingesetzt.

Merkmale der CNC-Steuerung

Die CNC-Steuerung verfügt über acht Achsenkanäle, die die separate Ansteuerung der Achsen ermöglichen. Sie ist prinzipiell für einen Betrieb mit Servo- und Schrittmotoren geeignet. In der vorhandenen Version sind jedoch alle Achsenkanäle für einen Betrieb mit Schrittmotoren ausgerüstet. Um verschiedenen Anwendungszwecken gerecht zu werden, ist die CNC-Steuerung mit einer Reihe von Schnittstellen versehen. Hiervon wird einzig der vom Hersteller als V24-Schnittstelle bezeichnete Ausgang für die Datenübertragung zu einem Hostrechner verwendet.

Den Kern der Elektronik bilden ein 8-Bit bzw. 16-Bit Prozessor, die die I/O-Operationen bzw. die Steuerung der Achsbewegungen kontrollieren. Sie verfügen über einen gemeinsamen Arbeitsspeicher von 65 kB RAM. Auf einem extern aufsteckbaren EPROM von weiteren 32 kB Speicherkapazität können Steuerprogramme, Positionsdaten und Parameterwerte archiviert werden. Die Bedienung der CNC-Steuerung kann entweder manuell über eine Tastatur erfolgen oder sie wird bei Fernsteuerung über die V24-Schnittstelle von einem Hostrechner übernommen.

Die I/O-Operationen sind für den Benutzer in Menüs geordnet und werden auf einem eingebauten Monitor angezeigt. Das Hauptmenü der Steuerung umfaßt acht weitere Untermenüs (Menü 0 bis 7). Die beiden ersten Menüs beziehen sich auf einen Handbetrieb der Achsen. Für jede Achse kann ein Referenzpunktsuchlauf durchgeführt werden. Die Achsen lassen sich im Handbetrieb entweder durch Vorgabe eines Positionssollwertes oder im Dauerlauf verfahren. Das Menü 7 ist für Parametereingaben zur Achsbewegung und Anpassung angeschlossener Meßapparaturen reserviert. Alle übrigen Menüs beziehen sich auf die Erstellung, Ausführung und Speicherung von Programmen, mit deren Hilfe ganze Sequenzen von Achsbewegungen ausgeführt werden können.

Die CNC-Steuerung unterscheidet zwei Typen von Betriebsprogrammen. Während CNC-Programme im wesentlichen aus Befehlen für die Steuerung der Achsen bestehen, erlauben SPS-Programme (Speicher-

Programmierbare- Steuerung) die bedingte Ausführung von Steuerbefehlen. Durch Integration der SPS-Programme werden in CNC-Programme Kontrollstrukturen eingearbeitet. Die CNC-Steuerung bietet einen umfangreichen Befehlssatz für die Erstellung von CNC- und SPS-Programmen an. Die Programme werden satzweise erstellt und in dieser Reihenfolge abgearbeitet. Jeder Satz darf aus mehreren Befehlen bestehen. Für die Erstellung von Betriebsprogrammen existiert in Menü 2 ein Editor. Betriebsprogramme können der CNC-Steuerung aber auch über die V24-Schnittstelle mitgeteilt werden.

Besonderheiten der CNC-Steuerung

In der vorhandenen Version steht der CNC-Steuerung durch vier zusätzlich installierte EPROMs eine Software zur Verfügung, die eine Statusabfrage und ein Auslesen der Positionsregister im Fernsteuerbetrieb über die V24-Schnittstelle ermöglicht. Sie gestattet einen minimalen Dialog zwischen Host-Rechner und CNC-Steuerung, welcher jedoch für die Verwendung der Steuerung im beschriebenen Meßaufbau ausreichend ist.

Verwendung der CNC-Steuerung

Beim Einsatz der CNC-Steuerung für die Positionierung des 3-Achsen-Tisches werden nur verhältnismäßig wenige Merkmale der Steuerung ausgenutzt. Im Mittelpunkt steht hierbei der ferngesteuerte Betrieb über die V24-Schnittstelle. Sie wird von einem Host-Rechner mittels einer speziell erstellten Software bedient. Die Messung einer Feldkarte bedeutet bei der Programmausführung die wiederholte Anwendung von zwei Prozeßschritten. Diese sind die Positionierung des Meßtischs und die Messung eines Feldwertes. Für die zeitliche Koordinierung beider Prozeßschritte ist es erforderlich, jeweils nur einen Positionier- bzw. Meßbefehl an das entsprechende Gerät zu schicken und den weiteren Programmablauf erst nach erfolgreicher Durchführung dieses Einzelprozesses fortzusetzen. Der CNC-Steuerung wird daher für jeden Positionierbefehl ein eigenständiges CNC-Programm übertragen. Dieses besteht allerdings nur aus einem einzigen Positionierbefehl, welcher die Sollposition der Meßtischachsen und die erforderliche Vorschubgeschwindigkeit enthält. eine automatisch durchgeführte Geradeninterpolation bewirkt, daß bei unterschiedlich zurückzulegenden Weglängen der jeweilige Endpunkt aller drei Achsen gleichzeitig erreicht wird. Durch Verwendung der Statusabfrage ist es möglich, das Ende eines Positioniervorgangs dem Host-Rechner mitzuteilen. Außer den Positionierbefehlen stellt die Ausführung eines automatischen Referenzpunktsuchlaufs den einzig weiteren Programmbefehl dar, der für den Betrieb des Meßtischs benötigt wird und mit einer Achsbewegung verknüpft ist. Diese Aktion wird der CNC-Steuerung nicht mittels eines CNC-Programms mitgeteilt, sondern direkt durch Auswahl einer vorhandenen Menüfunktion bewerkstelligt. Vermöge der Statusabfrage kann der Host-Rechner wiederum das

Ende dieser Aktion erkennen.

Für die Steuerung des Meßtischs werden nur die Achsenkanäle mit den Bezeichnungen *X*, *Y* und *Z* verwendet. Um einen störungsfreien Betrieb der CNC-Steuerung zu gewährleisten, müssen alle nicht verwendeten Achsenkanäle an einem 8-poligen DIP-Schalter im Geräteinneren der CNC-Steuerung außer Betrieb gesetzt werden.

Bevor ein ferngesteuerter Betrieb ausgeführt werden kann, müssen gewisse Parametereinstellungen manuell getätigt werden. Da diese Einstellungen auch nach Abschalten der Steuerung erhalten bleiben, müssen sie nur einmalig bei der ersten Inbetriebnahme der Feldmeßmaschine ausgeführt werden.

Zunächst muß die V24-Schnittstelle der CNC-Steuerung an die RS232-Schnittstelle des Host-Rechners angepasst werden. Die Einstellung an der Steuerung geschieht durch Einstellung von Baudrate, Parität und Anzahl der Daten- und Stopbits im Menü 5. Die Konfiguration der RS232-Schnittstelle des Host-Rechners wird mittels eines Shellscripts durchgeführt (vgl. Kapitel 4).

Im Menü 7 der CNC-Steuerung müssen die Parameterwerte für die Bewegung der Achsen und deren mechanischen Fabrikationsdaten wie z.B. Spindelsteigung angegeben werden. Alle relevanten Parameterangaben der Steuerung findet der Leser im Anhang dieser Arbeit. Im Parameterblock 1 wird die Reihenfolge der Achsen für einen automatischen Referenzpunkt-suchlauf festgelegt. Die Trennung der Achsangaben durch Semikolons bewirkt die Hintereinanderausführung der Referenzläufe für jede Achse. In den Parameterblöcken *X*, *Y* und *Z* werden u.a. die Eillauf- und Referenzlaufgeschwindigkeit festgelegt. Die Einheit der Geschwindigkeit wird in Hertz [Hz] angegeben. Es handelt sich dabei um die Anzahl der pro Sekunde an die Schrittmotoren gesendeten Schritimpulse. Aus der Anzahl der für eine Motorumdrehung benötigten Schritimpulse und der Spindelsteigung errechnet sich die Geschwindigkeit in Millimeter/Sekunde.

Die Eillaufgeschwindigkeit ist die maximale Geschwindigkeit, mit der eine Achse verfahren werden kann. Wird eine Fahrgeschwindigkeit gewählt, die kleiner als die Eillaufgeschwindigkeit ist, so bricht die Beschleunigung der Achsbewegung beim Erreichen der Fahrgeschwindigkeit ab. Die Rampe bestimmt die Beschleunigung beim Anfahren und Bremsen der Achsbewegung. Durch Angabe von Schritimpulsen wird festgelegt, nach wieviel gesendeten Impulsen die Fahrgeschwindigkeit erreicht sein soll. Reicht die Fahrstrecke bei gesetzter Rampe für das Erreichen der Fahrgeschwindigkeit nicht aus, so wird der Beschleunigungsvorgang nach der Hälfte der

Fahrstrecke abgebrochen und der Bremsvorgang mit gleicher (negativer) Beschleunigung eingeleitet.

Die Angabe des Getriebefaktors berücksichtigt die Spindelsteigung der Achsen bei der Anzeige der Tischpositionen in der Einheit Millimeter. Bei einem Referenzpunktsuchlauf wird jeweils ein Endschalter einer Achsenrichtung, der als Referenzschalter fungiert, angefahren. Sodann erfolgt ein Freifahren des Referenzschalters in umgekehrter Richtung um diejenige Fahrstrecke, die den im Parameterblock angegebenen Schrittimpulsen entspricht. Erst danach wird der Nullpunkt der Achse gesetzt. Hierdurch wird vermieden, daß bei Anfahren des Achsennullpunkts bei einem Betriebsablauf auch gleichzeitig der Endschalter angefahren wird.

Ein an der CNC-Steuerung befindlicher Drehschalter gestattet stufenweise die Manipulation der gewählten Fahrgeschwindigkeit zwischen 0 und 150 %. Die Normalstellung dieses Schalters beträgt 100 %. Abgesehen von diesen einmalig vorzunehmenden Einstellungen wird die CNC-Steuerung im dargestellten Meßaufbau ausschließlich im Fernsteuerungsbetrieb über die V24-Schnittstelle angesteuert. Manuelle Eingriffe sind dann nicht mehr erforderlich.

3.2.3 Fahrmimik

Der Fahrbereich des Meßtischs ist in den horizontalen Richtungen mit $660 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ zu klein, um auf einer einzigen Meßtischposition den gesamten Feldbereich eines COSY-Dipols zu vermessen. Daher besteht die Notwendigkeit, den Meßtisch bzw. die Meßsondenhalterung um definierte Abstände relativ zum Magneten zu versetzen, um somit den gesamten Feldbereich des Magneten einer Messung zugänglich zu machen.

Der Versatz des Meßtischs parallel zur Strahlrichtung des Magneten wird durch eine Fahrmimik bewerkstelligt. Sie besteht aus einer gezahnten Fahrschne, über die ein Wagen mit Handkurbelantrieb bewegt werden kann. Die Fahrschne ist fest im Laborboden verankert und mit Feinmörtel ausgegossen, um ein Durchbiegen bei Belastung zu verhindern. Der Unterbau des Meßtischs ist auf dem Wagen mit Schraubklemmen fixiert. Zwischen den beiden Fahrschneen befinden sich in festen Abständen von etwa 300 mm Fassungen mit kegelförmiger Öffnung, in die ein am Meßtischwagen montierter, konusförmiger Paßbolzen eingesetzt werden kann. Der Paßbolzen ist mit einer Überwurfmutter versehen. Ein Anziehen dieser Mutter gewährleistet, daß der Paßbolzen exakt in die Fassung abgesenkt wird (vgl. Abbildung 3.3). Es stehen insgesamt dreizehn verschiedene Fas-

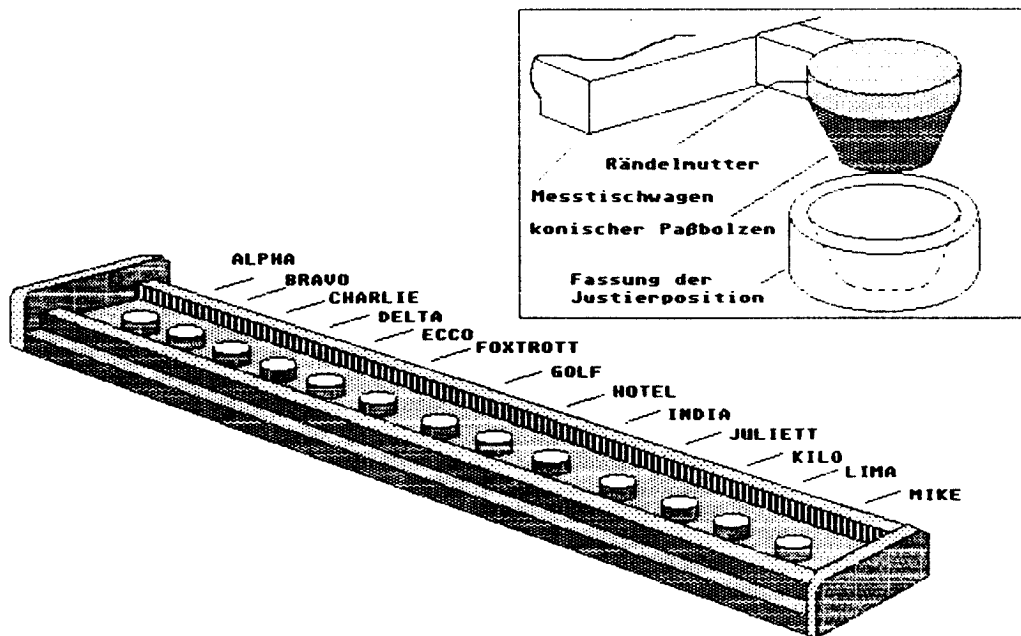


Abbildung 3.3: Fahrschne (ohne Messtischwagen) mit Bezeichnung der Messtischpositionen.

sungen für die Positionierung des Messtischs zur Verfügung. Sie sind mit den Namen *alpha* bis *mike* gekennzeichnet. Der Meßbereich in Strahlrichtung des Magneten wird somit auf etwa 4200 mm erweitert.

Die genauen Abstände der Messtischpositionen sind mit einem Laserinterferometer überprüft worden [Krol 90]. Sie werden bei einer Justierung des Messtischs zum Magneten berücksichtigt. Die Reproduzierbarkeit der Positionierung des Messtischs auf einer Tischposition beträgt etwa 0,1 mm.

3.2.4 Meßsondenhalterung

Die Meßsondenhalterung besteht aus einem zylinderförmigen GFK-Rohr, welches einen Durchmesser von 30 mm und eine Länge von 2020 mm besitzt. An einem Ende wird die Steckerbuchse eines Hallsondenträgers mittels zweier Fixierschrauben in einer Fassung gehalten. Entlang des Rohrs sind in einem Abstand von 160 mm elf Paßstifte aus unmagnetischen Material eingearbeitet. Auf dem Fahrschlitten der Z-Achse des Messtischs ist andererseits ein Brett befestigt, welches Bohrungen im gleichen Abstand zur Aufnahme der Paßstifte besitzt. Damit kann die Meßsondenhalterung mit einem Versatz von jeweils 160 mm auf das Brett gesteckt werden. Eine rechtwinklig zum Brett angebrachte Leiste unterstützt dabei die aufge-

steckte Meßsondenhalterung (vgl. Abbildung 3.4). Durch diese Vorrichtung wird daher auch der räumliche Meßbereich in X -Richtung des Magneten erweitert.

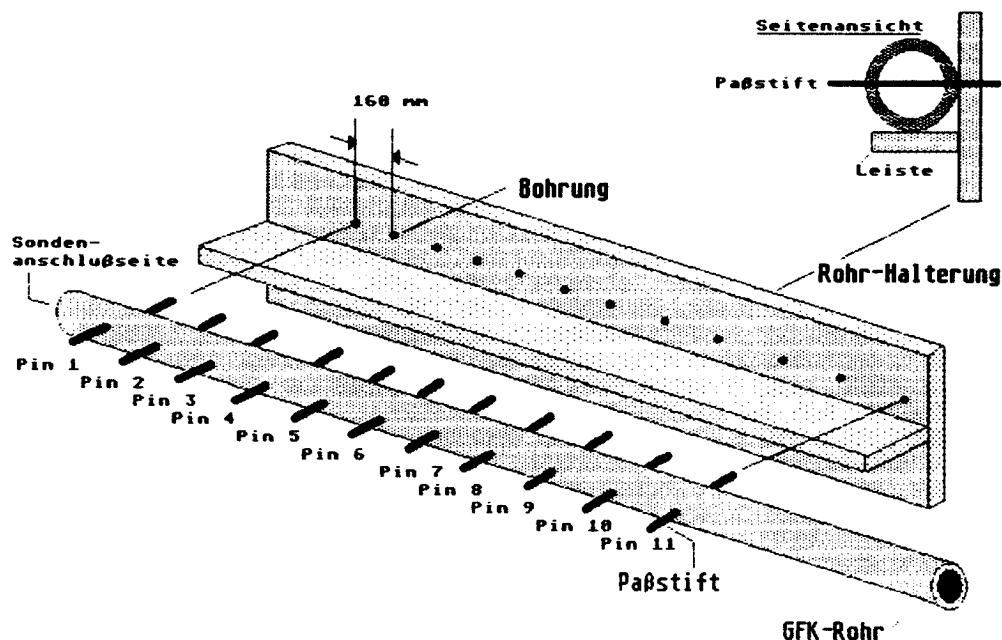


Abbildung 3.4: Meßsondenhalterung mit Bezeichnung der Paßstifte.

3.3 Meßapparatur

3.3.1 Meßsonden

Die Messung der Komponenten der magnetischen Induktion geschieht mit drei Hallgeneratoren der Firma Siemens. Sie tragen die Typenbezeichnungen SBV 601-S1. Hallgeneratoren dieses Typs sind aus dem Halbleitermaterial InAs angefertigt und zeichnen sich durch einen besonders geringen Temperaturkoeffizienten von etwa 0,2 %/K in einem Temperaturbereich zwischen 0 und 100 Grad Celsius aus [Siem].

Der Nennwert des Steuerstroms eines Hallgenerators beträgt 300 mA. Zur Verlängerung der Lebensdauer wird er jedoch nur mit einem Steuerstrom von 200 mA belastet. Den Steuerstrom liefert eine Konstantstromquelle der Firma Siemens. Eine Messung des Steuerstroms über einen gesamten Zeitraum von vier Stunden in Zeitabständen von 30 s hat ergeben, daß eine relative Genauigkeit von 10^{-5} dieses Stromwerts eingehalten wird.

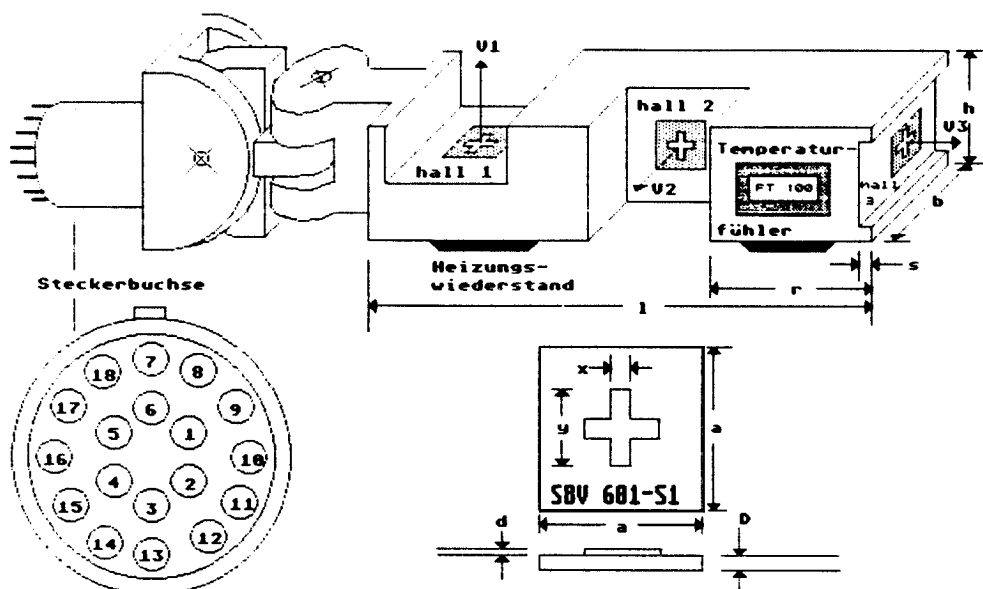


Abbildung 3.5: Geometrie der Hallsonde und des Hallsondenträgers.

Die Hallgeneratoren stehen paarweise senkrecht zueinander und sind im Abstand von 20 mm entlang einer Achse auf einem Hallsondenträger befestigt. Die Abbildung 3.5 zeigt die Geometrie eines Hallsondenträgers sowie einer einzelnen Hallsonde. Die Maßangaben und die Pinbelegung der Steckerbuchse findet der Leser im Anhang.

Auf der Unterseite eines Hallsondenträgers befinden sich Heizungs-widerstände, die den gesamten Sondenträger auf eine Betriebstemperatur von 40°C erhitzen. Ein Widerstandsthermometer des Typs PT 100 dient als Temperaturfühler. Es ist mit einer Wärmeleitpaste auf einer der Seitenflächen des Sondenträgers befestigt. Die Heizung und der Temperaturfühler sind an einen Regler der Firma Julabo angeschlossen. Die benötigte Betriebstemperatur wird hier manuell vorgewählt. Um Abweichungen von der Betriebstemperatur von mehr als $0,1^{\circ}\text{C}$ zu vermeiden, wird zur Verminderung der Wärmeabstrahlung eine Schaumstoffhülse über den Hallsondenträger gesteckt.

Für eine Messung der Feldkomponenten eines Magneten müssen die Normalenrichtungen der Hallsonden $V1$ bis $V3$ in Koinzidenz mit den Achsen des MKS-Systems gebracht werden. Die vorhandenen Gelenke des Sondenträgers gestatten zu diesem Zweck ein horizontales bzw. vertikales Schwenken. Ferner kann die Steckerbuchse in der Fassung des GFK-Rohrs gedreht und mittels zweier Klemmschrauben fixiert werden (vgl. Abschnitt 3.2.4).

Die Anschlußleitungen der Hallgeneratoren bestehen aus dünnen Kupferdrähten, welche zwecks Isolierung mit einem Schutzlack überzogen sind. Die Steuerstromanschlüsse der drei Hallsonden sind dabei in Reihe geschaltet. Zur Vermeidung induktiver elektromagnetischer Einstreuungen sind die Anschlußdrähte zur Messung der Hallspannung gegeneinander verdreht. Dies betrifft die gesamte Meßleitung, sofern sie im Feldbereich des Magneten verläuft.

Alle Hallgeneratoren sind in der genannten Anordnung in einem bekannten, homogenen Magnetfeld bei einem Steuerstrom von 200 mA und einer Betriebstemperatur von 40° C über einen Feldwertbereich von -24 kG bis +24 kG geeicht worden [Sage 88]. Die Eichkurve eines jeden Hallgenerators wird durch ein Polynom 15. Grades beschrieben. Da die Eichkurven nicht punktsymmetrisch bzgl. $B = 0$ liegen, sind die Hallspannungsanschlüsse entsprechend der Eichung gekennzeichnet.

3.3.2 Digitalvoltmeter

Für die Messung der Hallspannung einer jeden Hallsonde werden insgesamt drei Systemvoltmeter 7061 der Firma Schlumberger verwendet. Es handelt sich hierbei um Digitalvoltmeter, mit denen Spannungen, Ströme und Widerstände gemessen werden können. Sie sind mit einer Vielzahl von Zusatzfunktionen ausgerüstet, mit deren Hilfe verschiedene Meßarten derselben Eingangsgröße eingestellt werden können. Der eingebaute Mikroprozessor steuert nicht nur die Messungen, sondern er erlaubt auch eine statistische Analyse von Meßdaten. Alle Funktionen können sowohl über die Fronttastatur als auch im Fernsteuerbetrieb über eine IEEE-488 Schnittstelle ausgeführt werden. Für einen Fernsteuerungsbetrieb werden über die Fronttastatur den einzelnen Geräten Adressnummern zugewiesen.

Im vorhandenen Meßaufbau ist lediglich die Messung einer Gleichspannung von Interesse. Bei einem über die Schnittstelle empfangenen Triggersignal wird eine Einzelmessung durchgeführt. Hierbei wird die Eingangsspannung über einen vorwählbaren Zeitraum integriert. Der Meßwert ergibt sich dann aus der Division des Spannungszeitintegrals durch die Integrationszeit und stellt somit einen Mittelwert der Eingangsspannung über den betrachteten Meßzeitraum dar. Anschließend wird der Meßwert in einem internen Meßwertspeicher hinterlegt. Er besitzt eine Kapazität zur Speicherung von maximal 8000 Meßwerten. Der Inhalt eines Meßwertspeichers kann über die Schnittstelle ausgelesen werden.

Im folgenden seien diejenigen Einstellungen des Systemvoltmeters, die für die Messung einer Gleichspannung im Nennbereich bis zu 200 mV

benötigt werden, kurz erläutert. Die Einstellung *digits* legt die Anzahl der Zahlenstellen der Meßwertanzeige fest. Diese Einstellung bestimmt gleichzeitig die Integrationszeit für die Messung einer Eingangsspannung. Das Zuschalten eines Filters verbessert das Signal/Rauschverhältnis, indem die Integrationszeit um den Faktor 4 verlängert wird. Die gesamte Meßzeit für die Aufnahme eines Meßwerts setzt sich dann aus einer Triggererkenntniszeit, einer Einschwingverzögerung und der Integrationszeit zusammen. Während dieser Meßzeit darf die Hallsonde bei Messung einer Feldkomponente nicht bewegt werden. Eine Berechnungstabelle der Meßzeiten findet sich in der Bedienungsanleitung [Schlum 88]. Die Meßgenauigkeit eines Meßwertes ist durch die Integrationszeit und daher mittelbar durch die Einstellung der Zahlenstellen festgelegt. Sie ist umso größer, je länger die Integrationszeit gewählt wird. Eine genauere Betrachtung der Meßgenauigkeit wird in Kapitel 5 dieser Arbeit durchgeführt.

3.4 Rechner

Die Steuerung der Feldmeßmaschine sowie die Auswertung und Verwaltung von Meßdaten wird von einem Multiprozessor der Firma Hewlett Packard aus der Serie 9000/330 übernommen. Er besitzt u.a. eine serielle RS232-Schnittstelle und eine parallele IEEE-488-Schnittstelle für den Anschluß der Tischsteuerung, der Systemvoltmeter und mehrerer Bedienungsterminals. Es sind insgesamt zwei Festplatten zu je 300 MB Speicherkapazität vorhanden. Während auf einer dieser Festplatten das Betriebssystem UNIX der Version 7.0 archiviert ist, steht die andere Festplatte zur Aufnahme von Daten zur Verfügung. Auf ihr befinden sich u.a. das Steuerprogramm der Feldmeßmaschine und die Datensätze der Feldmessungen. Ferner besteht eine Netzwerkverbindung zu weiteren Rechnern, über die verschiedene Ausgabegeräte wie Lineprinter, Laserdrucker und Farbplotter für die Ausgabe von Meßergebnissen zur Verfügung stehen.

Insbesondere ist das Steuerprogramm abermals auf der Datenfestplatte eines noch leistungsfähigeren Rechners der Serie 9000/855 installiert. Hier läßt sich eine Auswertung der teilweise recht umfangreichen Meßwertdateien schneller durchführen. Ein automatisches Backupsystem sorgt hier für die Datensicherung. Die Meßdaten können außerdem auf Magnetbändern abgespeichert werden.

Kapitel 4

Programmgesteuerter Betrieb der Feldmeßmaschine

Dieses Kapitel erläutert den programmgesteuerten Betrieb der Feldmeßmaschine. Es bezieht sich einerseits auf die Architektur des Steuerprogramms **hall**, welche ein besseres Verständnis seiner Funktionsweise erlaubt. Andererseits wird anhand der Benutzung des Steuerprogramms die Methodik einer Feldkartenmessung dargestellt. Sie umfaßt die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung einer Messung, wodurch sowohl die Meßmethode als auch die Darstellung der Meßergebnisse erhellt wird.

4.1 Das Steuerprogramm „hall“

4.1.1 Programmentwicklung

Das Steuerprogramm **hall** ist auf einem Hewlett Packard Rechner der Serie 9000/330 entwickelt worden. Dieser Großrechner kann von mehreren Benutzern gleichzeitig benutzt werden. Jeder Benutzer besitzt zu diesem Zweck einen Benutzernamen, der ihm den Zugriff auf den Rechner gestattet. Das installierte Betriebssystem UNIX Version 7.0 ermöglicht den Dialog mit dem Rechner. Hierfür stehen zahllose Betriebssystembefehle zur Verfügung, die u.a. die Erstellung und Verwaltung von Dateien betreffen.

Für die Erstellung von Dateien bietet UNIX den bildschirmorientierten *vi-editor* an. Er wird für die Programmtexterstellung benutzt. Ferner sind Übersetzerprogramme (*Compiler*) für die Programmiersprachen C und FORTRAN vorhanden. Aufgrund der engen Verwandtschaft der

Programmiersprache C mit UNIX ist das Steuerprogramm zum weitaus größten Teil in dieser Programmiersprache verfasst. Die Ausnahme bilden zwei in FORTRAN geschriebene Programmroutinen, die eine Polynomannpassung an Werteverteilungen ermöglichen. Der Programmtext entstammt dem Werk [Bev 68].

Als Hochsprache erlaubt C den Aufbau eines Programms aus einzelnen Programmroutinen. Der Sprachumfang von C ist vergleichsweise gering. Eine Vielzahl von Programmroutinen stehen bereits als Bibliotheksfunktionen zur Verfügung. Hierzu zählt u.a. die **DIL**-Bibliothek (Device Independent Library), welche Funktionen für die Bedienung der IEEE-488-Schnittstelle bereithält. Unter Verwendung der Sprachelemente von C und der Bibliotheksfunktionen lassen sich neue Programmroutinen erstellen, welche jeweils ein individuelles Problem lösen. Ferner können alle Betriebssystembefehle in ein C-Programm eingearbeitet werden. Mehrere Programmroutinen lassen sich schließlich zu einem Programm zusammenfassen.

Das Steuerprogramm besteht insgesamt aus 71 Programmroutinen, deren Quelltext in 58 Dateien enthalten ist. Die Größe des *compilierten* Programms beträgt 200 kB. Für die Übersetzung des Programms in einen ausführbaren Maschinencode (Erstellung einer ausführbaren Objektdatei) ist die Verwendung eines *makefile* von großem Vorteil.

Das *makefile* ist eine Datei, die außer den Dateinamen aller Programmdateien den Übersetzungsbefehl einschließlich aller Einbindeoptionen enthält. Durch den *make*-Befehl werden dann nur die seit der letzten Übersetzung neu editierten Programmteile in einzelne Objektdateien übersetzt und anschließend mit den alten Objektdateien erneut zu einer einzigen, ausführbaren Objektdatei – dem Steuerprogramm **hall** – zusammengebunden. Die Modulstruktur des Programms gestattet den gezielten Test einzelner Programmteile.

Ein vorhandenes Graphikprogramm namens **IGM** (Interactive Graphics Monitor) wird für die graphische Darstellung 2-dimensionaler Werteverteilungen benutzt. Es kann sowohl interaktiv als auch von einem C-Programm aus benutzt werden, indem ihm die benötigten Graphikbefehle in einer Datei zur Verfügung gestellt werden.

Das Betriebssystem UNIX gestattet weiterhin eine Programmierung mittels **Shellscripts**. Es handelt sich dabei um ausführbare Dateien, deren Inhalt aus Betriebssystembefehlen und Kontrollstrukturen besteht. Als Zusatz zum Steuerprogramm *hall* existieren zwei Shellscripts, mit denen sich eine Programmliste erstellen bzw. die Konfiguration der RS232-Schnitt-

stelle auf der Seite des Rechners ausführen läßt.

4.1.2 Programmstruktur und Handhabung

Aus der Sicht des Anwenders gliedert sich das Steuerprogramm in natürlicher Weise in zwei voneinander unabhängige Abschnitte. Ein Teil dient zur Vorbereitung und Durchführung einer Feldkartenmessung, während der andere Teil eine Auswertung der Meßdaten erlaubt.

Die Strenge Teilung dieser Aufgaben ist deshalb erforderlich, um die ohnehin schon zeitaufwendige Messung einer Feldkarte nicht noch zusätzlich durch eine automatisierte Datenauswertung zu verlängern. Dies hätte außerdem zur Konsequenz, daß ohne die Möglichkeit einer separaten Datenauswertung eine Vielzahl von Meßwertdateien erstellt werden müßte, welche die Daten in jeder gewünschten Form der Präsentation enthalten. Dadurch würde die Speicherkapazität des Rechners in unzulässiger Weise beansprucht.

Die oben genannte Einteilung in zwei in sich autonome Programmteile hat deshalb zur Folge, daß der Benutzer der Feldmeßmaschine eine spezifische Auswertung der Meßdaten eigens vornehmen muß. Während der Messung werden nur die tatsächlich gemessenen Daten abgespeichert. Diese Datensätze können nur auf ausdrücklichen Wunsch hin wieder gelöscht werden. Sie bilden zugleich die Ausgangsbasis für den Programmteil der Datenauswertung. Dort können diese Datensätze gezielt analysiert werden. Das Resultat einer Auswertung wird ebenfalls als Datensatz gespeichert. Dieser bleibt jedoch nur solange erhalten, bis daß eine neue Auswertung vorgenommen wird. Die Ausgabe eines ausgewerteten Datensatzes muß also unmittelbar nach seiner Erzeugung angefordert werden.

Ein zusätzlicher Vorteil dieser Aufgabentrennung besteht darin, daß eine Datenauswertung parallel zu einer Feldmessung erfolgen kann. Da das Steuerprogramm zusätzlich auf der Datenfestplatte eines anderen, leistungsfähigeren Rechners (HP 9000/855) vorhanden ist, beeinflusst eine dort vorgenommene Datenanalyse den für die Messung zuständigen Rechner in keiner Weise.

4.1.3 Benutzeroberfläche

Der Benutzer des Steuerprogramms trifft eine Auswahl der gewünschten Aktion mit Hilfe von Menütafeln. Die Menüs stellen einen Leitfaden für

die Benutzung des Programms dar und sind daher hierarchisch geordnet. An oberster Stelle steht das Hauptmenü, von dem aus entweder der Meßprozeß oder eine Datenauswertung eingeleitet wird. Zusätzlich bietet es eine Hilfsfunktion zur Verwaltung von Meßwertdateien.

Die Menüs besitzen eine Standardform. Eine Kopfzeile informiert über das jeweils angewählte Menü. Hierauf folgt eine Liste der zur Verfügung stehenden Optionen, welche mit einer Kennziffer versehen sind. In der Schlußzeile eines Menüs fordert die Meldung *Auswahl:* zur Eingabe der Kennziffer der gewünschten Option auf. Die Option mit der Kennziffer „0“ besitzt stets die Funktion, das aufgeschlagene Menü wieder zu verlassen. Es erfolgt der Rücksprung zum jeweils in der Hierarchie höhergelegenen Menü. Ein Verlassen des Hauptmenüs beendet das Programm.

Farbig dargestellte Optionen eines Menüs bedeuten, daß sie momentan zur Verfügung stehen. Farblos dargestellte Optionen eines Menüs hingegen signalisieren, daß sie gegenwärtig nicht angewählt werden können, da die mit ihnen verknüpften Funktionen Parameter benötigen, welche erst durch andere Funktionen bereitgestellt werden müssen. Es gilt jedoch stets, daß die fehlenden Parameter mit Hilfe einer anderen Option desgleichen Menüs ermittelt werden können. Die Gestaltung der Auswahlmenüs mit dieser Technik gewährleistet eine hinreichende Benutzerführung.

Durch die Verwendung von Menüs wird ferner der Eingabeaufwand erheblich reduziert. Ferner sind alle übrigen Eingaben, die nicht die Wahl einer Menüoption betreffen, auf die absolut notwendige Eingabeinformation beschränkt. Der Aufwand der Programmgestaltung mittels Menüs wird durch die Reduzierung der Fehlerquellen bei Programmeingaben gerechtfertigt. Dies führt u.a. zu einer erhöhten Betriebssicherheit des Programms.

4.2 Datenorganisation

4.2.1 Allgemeine Datenorganisation

Im Betriebssystem UNIX unterscheidet man drei verschiedene Typen von Dateien :

1. gewöhnliche Dateien
2. Verzeichnisse
3. spezielle Dateien

Während gewöhnliche Dateien einen grundsätzlich beliebigen Datensatz zu einer Einheit zusammenfassen, setzen sich die Inhalte der Verzeichnisse aus den Namen der darin enthaltenen gewöhnlichen Dateien und weiterer Unterverzeichnisse zusammen. Die Verzeichnisse gestatten somit die hierarchische Anordnung der Dateien in einem Dateibaum, dessen Wurzel das Verzeichnis „/“ bildet. Dem Rechner sind extern angeschlossene Geräte als spezielle Dateien bekannt, welche ebenfalls im Dateibaum angesiedelt sind. Der Zugriff auf diese Geräte ist daher identisch mit den I/O-Operationen gewöhnlicher Dateien.

Auf den Festplatten verschiedener Rechner sind Unterabschnitte des Dateibaums gespeichert. Sie selbst sind als Verzeichnisse im Dateibaum eingetragen. Solange eine Netzwerkverbindung der Rechner besteht, hat der Benutzer *eines* Rechners über den Dateibaum Zugriff auf die Datenplatten anderer Rechner.

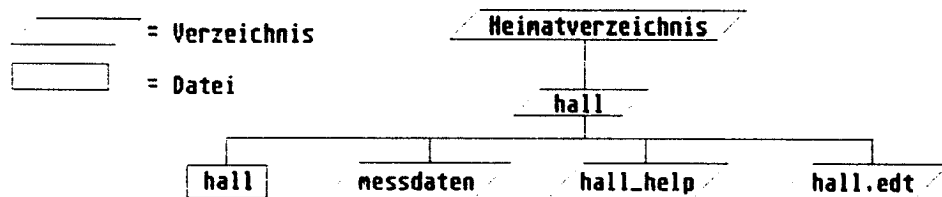


Abbildung 4.1: Dateiorganisation des Steuerprogramms

Jeder Benutzer eines Rechners besitzt im Dateibaum ein eigenes Heimatverzeichnis. Dort kann er weitere Verzeichnisse und Dateien kreieren. Die Abbildung 4.1 zeigt denjenigen Ausschnitt des Dateibaums, in welchen alle das Steuerprogramm betreffenden Daten angelegt sind. Sie werden im Verzeichnis *hall* zusammengefasst und bestehen aus dem Verzeichnis *messdaten*, welches alle Rohdaten einer Feldmessung beinhaltet, einem Hilfsdatenverzeichnis *hall_help*, dessen Inhalte das Steuerprogramm benötigt, einem weiteren Verzeichnis *hall.edt*, in dem alle Programmroutinen zusammengefasst sind und letztlich dem Steuerprogramm *hall* selbst. Die Installation des Programms auf den Datenplatten zweier Rechner bedeutet, daß im Dateibaum zwei Heimatverzeichnisse existieren, welche das Unterverzeichnis *hall* besitzen. Ihre Namen unterscheiden sich nur in der Angabe der Datenplatte (*/mnt/of-1/cm/heimatverzeichnis* bzw. */mnt/o3/cm/heimatverzeichnis*).

4.2.2 Organisation der Meßwertdateien

Alle Meßwertdateien, welche die Rohdaten einer Feldmessung speichern, sind in dem Verzeichnis *messdaten* zusammengefasst. Zur Klassifizierung der Meßwertdateien entsprechend den Parametern einer Feldmessung ist dieses Verzeichnis in mehrere Unterverzeichnisse eingeteilt (vgl. Abbildung 4.2).

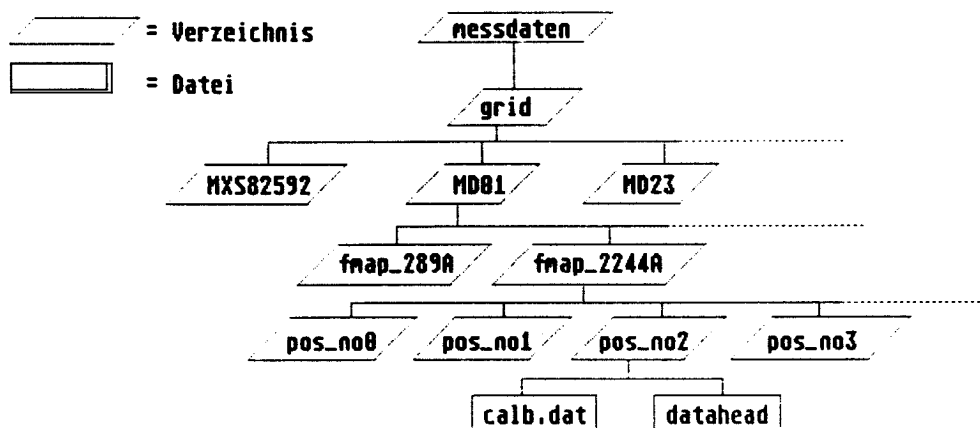


Abbildung 4.2: Organisation der Meßwertdateien

Die Standardisierung der Struktur dieses Verzeichnisses ist für ein eindeutiges Abspeichern und späteres Auffinden von Meßwertdateien erforderlich. Eine einzelne Feldkartenmessung wird durch den Namen des Meßobjekts, den eingestellten Erregungsstrom und durch eine fortlaufende Nummer der Messung spezifiziert. Der vollständige Datensatz einer solchen Einzelmessung besteht aus einer Meßparameterdatei *datahead* und der Felddatendatei *calb.dat*. Während die Parameterdatei Information über Meßobjekt, Datum, Experimentator, Meßbereich und Meßgenauigkeit enthält, beinhaltet die Felddatendatei die Ortskoordinaten (x, y, z) und die Feldkomponenten (B_x, B_y, B_z) aller vermessenen Raumpunkte. Die Felddaten sind in der angegebenen Reihenfolge notiert und in der Einheit Millimeter bzw. Tesla dargestellt.

Der Inhalt des Verzeichnisses *messdaten* wird ausschließlich vom Steuerprogramm kontrolliert. Beim Speichern von Felddaten nach einer Messung werden die durch die Meßparameter charakterisierten Verzeichnisse automatisch erstellt, sofern sie nicht schon vorhanden sind. Bei einer Auswertung von Felddaten greift das Programm auf die Inhalte des Verzeichnisses *messdaten* zurück. Die hier gespeicherten Rohdaten bilden den Ausgangspunkt einer Datenanalyse. Das Steuerprogramm stellt im Hauptmenü eine Hilfsfunktion zur Verfügung, mit deren Hilfe der Inhalt dieses Verzeich-

nisses kontrolliert werden kann. Einzelne Abschnitte lassen sich anzeigen, ausdrucken und löschen. Gelöschte Rohdaten gehen unwiderruflich verloren, sofern nicht eine Sicherungskopie auf Magnetband erstellt wurde.

4.2.3 Datensicherung

Für die Datensicherung existiert ein automatisiertes Backupsystem. Dieses erstellt Sicherheitskopien der Datenplatten verschiedener Rechner. Man unterscheidet ein täglich durchgeführtes, *inkrementales* Backup, welches von den in diesem Zeitraum neu editierten Dateien eine Sicherheitskopie anfertigt, sowie ein *generelles* Backup, welches in größeren Zeitabständen eine Sicherheitskopie einer ganzen Datenplatte erstellt. Das Steuerprogramm sowie die Meßdaten befinden sich u.a. auf der Datenplatte eines Rechners der Serie 855, für die das beschriebene Sicherungssystem besteht. Bei dem für die Messung zuständigen Rechner der Serie 330 muß ein Backup eigens durchgeführt werden. Für die Speicherung von Daten (Meßdaten) ist dieser Rechner mit einer Magnetbandstation ausgerüstet.

4.3 Vorbereitung einer Feldkartenmessung

Die Vorbereitung einer Feldkartenmessung besteht einerseits aus der Bereitstellung eines Teils der benötigten Meßparameter, andererseits aus der Justierung der Feldmeßmaschine in Bezug auf das Meßobjekt. Die erforderlichen Maßnahmen können alle durch Wahl der entsprechenden Funktion des Menüs *Systemeinstellung*, welches ein Untermenü des Meßmenüs darstellt, durchgeführt werden.

Die hier eingestellten Meßparameter müssen nicht notwendigerweise vor einer jeden Feldmessung abgeändert werden. Der Benutzer kann gezielt den Wert einzelner Parameter zur Anzeige bringen und ihn auf Wunsch abändern. Die eingestellten Werte bleiben auch nach Beendigung des Steuerprogramms erhalten, da sie im Verzeichnis *hall_help* abgespeichert werden. Zwar wird auf diese Weise der Eingabeaufwand für die Parameter einer Messung minimiert, jedoch ist die korrekte Einstellung dieser Parameter für einen störungsfreien Betrieb der Feldmeßmaschine unbedingt erforderlich und muß deshalb gegebenenfalls vom Experimentator überprüft werden.

4.3.1 Wahl der Meßparameter

Die im Menü *Systemeinstellung* wählbaren Meßparameter sind der Name des Meßobjekts, der verwendete Hallsondenträger, die durch die zusätzlichen Endschalter festgelegten Fahrbereichsgrenzen des Meßtischs, die Meßgenauigkeit der Systemvoltmeter und eine Verzögerungszeit des Meßtriggersignals.

Die Angabe des Meßobjektnamens hat zur Folge, daß alle Meßdaten in dem entsprechenden Unterabschnitt des Verzeichnisses *messdaten* abgespeichert werden (vgl. Abbildung 4.2).

Die Wahl des Hallsondenträgers vermittelt dem Steuerprogramm, welcher der Datensätze von Eichkoeffizienten bei einer Umrechnung der gemessenen Hallspannungen in Magnetfeldgrößen zu verwenden ist.

Mittels der verschiebbar angeordneten, zusätzlichen Endschalter wird der Fahrbereich des Meßtischs an die geometrischen Abmessungen des Meßobjekts angepasst. Dies verhindert ein Beschädigen des Hallsondenträgers. Da ein Anfahren dieser Endschalter ein nicht vorgesehener Betriebszustand der Feldmeßmaschine darstellt, muß diese Situation vermieden werden. Dies geschieht durch Mitteilung der Position dieser Endschalter in Koordinaten des Meßtischs (d.h. in TKS-Koordinaten, vgl. Abschnitt 4.3.4). Daraufhin verhindert das Steuerprogramm die spätere Eingabe eines zu großen Meßbereichs, der zu einem Anfahren der Endschalter führen würde.

Die Meßgenauigkeit der Systemvoltmeter ist unmittelbar an die Einstellungen *Filter=Ein/Aus* und die Anzahl der darzustellenden Zahlenstellen (*digits=4, 5, 6, 7*) eines Meßwertes verknüpft. Die Wahl einer der acht möglichen Einstellungen legt daher mit der Meßgenauigkeit auch die entsprechend benötigte Meßzeit fest. Während einer Feldmessung verweilt der Meßtisch mindestens diesen Zeitraum auf der angefahrenen Position. Bei großen Meßobjekten (z.B. COSY-Dipol) verbietet sich eine maximale Meßgenauigkeit (*Filter=Ein, digits=7*), da die Meßzeit für einen einzelnen Meßwert mit über 8 Sekunden eine zu große Gesamtmeßzeit ergeben würde. Eine Messung mit derartiger Genauigkeit ist höchstens an kleineren Magneten sinnvoll. Eine brauchbare Einstellung für Feldkartenmessungen mit genügender Genauigkeit ist bereits durch die Wahl von *Filter=Ein, digits=6* mit einer resultierenden Meßzeit von 1.5 s/Feldwert gegeben.

Die Fahrbewegung des Meßtischs versetzt das GFK-Rohr der Hallsondenhalterung in Schwingungen, welche nach Erreichen einer Meßposition noch andauern. Befriedigende Meßresultate insbesondere im Streufeldbereich mit großen Feldgradienten lassen sich nur erzielen, wenn die Schwing-

ungsamplitude auf die Größenordnung 0,1 mm abgefallen ist. Zu diesem Zweck kann eine Verzögerungszeit vor Beginn der Aufnahme eines einzelnen Meßwertes gesetzt werden. Die Größe der Schwingung wird u.a. durch den Wert der Rampe beim Bremsvorgang bestimmt. Die Verzögerungszeit muß im Zusammenhang mit dem Rampenwert optimiert werden, um eine möglichst geringe Gesamtmeßzeit zu erzielen.

4.3.2 Test & Initialisierung der Systemvoltmeter

Die Initialisierung der Systemvoltmeter umfaßt eine Grundinitialisierung, die die Geräte in einen definierten Ausgangszustand versetzt. Zusätzlich wird jedes Gerät in einen für die Feldmessung zweckmäßigen Zustand versetzt. Hierzu zählen die Unterdrückung der Meßwertanzeige, die Verriegelung der Fronttastatur, die Einstellung des Meßmodus, die Festlegung des Meßbereichs und das Setzen des Ausgabebegrenzers für Schnittstellenkommunikation. Ferner werden die Einstellungen mehrerer mechanischer Schalter mittels einer Statusabfrage überprüft. Dieser Test stellt sicher, daß bei Austausch baugleicher Geräte die für die Messung erforderlichen Einstellungen getätigt wurden.

Nach der Initialisierung eliminiert ein Nullabgleich der Voltmeter kleine Gleichstromabweichungen von maximal 2% des gewählten Meßbereichs. Zu diesem Zweck werden die Meßleitungen der Geräte kurzgeschlossen. Ferner wird eine Driftkorrektur aktiviert, welche im Abstand von 15 min eine interne Drift des Meßgeräts ausgleicht.

4.3.3 Justierung der Feldmeßmaschine

Für die Positionierung des Hallsondenträgers an beliebigen Raumpunkten des Meßobjekts muß die räumliche Beziehung zwischen Meßobjekt und Meßtisch bekannt sein. Sie wird durch eine lineare Koordinatentransformation zwischen den Bezugssystemen des Meßtischs (TKS-System) und des Meßobjekts (MKS-System) vermittelt und ist von der Form :

$$\begin{aligned} T : \quad \text{MKS} &\longrightarrow \text{TKS} \\ \mathbf{r}_{\text{MKS}} &\longmapsto \mathbf{r}_{\text{TKS}} = \underline{\underline{\mathbf{A}}} \mathbf{r}_{\text{MKS}} + \mathbf{T}_{\text{TKS}} \end{aligned}$$

Hierin bedeutet $\underline{\underline{\mathbf{A}}}$ eine orthogonale Drehmatrix positiver Determinante

und T der die Ursprünge beider Bezugssysteme verbindende Translationsvektor. Die Indizierung weist auf die Koordinatendarstellung der Vektoren im jeweiligen Bezugssystem hin.

Die Definition des MKS-Systems für einen COSY-Dipol ist in Abbildung 2.2 gezeigt. Das TKS-System ist durch die Achsen des Meßtischs festgelegt. Sein Ursprung befindet sich im Zentrum der dritten Hallsonde, wenn alle Meßtischachsen im Tischnullpunkt ruhen (z.B. nach einem Referenzlauf) und die Hallsondenhalterung in derjenigen Steckposition sitzt, die bei der Justierung der Feldmeßmaschine verwendet wurde (vgl. Abb. 3.2, 3.4, 3.5).

Eine vollständige Vermessung von großen Meßobjekten (COSY-Dipol) erfordert ein mehrfaches Versetzen des Meßtischs. Dadurch wird die relative Lage beider Bezugssysteme verändert, d.h. die Parameter der Koordinatentransformation verändern sich. Aus praktischen Gründen verbietet sich eine Wiederholung der Justierung bei jedem Versatz des Meßtischs. Die Verwendung einer Fahrminik, mit deren Hilfe der Meßtisch auf genau vermessene Rasterpositionen gesetzt werden kann, erlaubt die Bestimmung der Transformationsparameter aller Meßtischpositionen aus der Justierung des Meßtischs auf einer einzigen Rasterposition.

Die Eigenschaften der Fahrminik sind mit einem Laserinterferrometer überprüft worden [Krol 90]. Dies betrifft die genaue Vermessung der Abstände der Rasterpositionen, die Reproduzierbarkeit der Positionierung des Meßtischs auf allen Rasterpositionen und die Verdrehung des TKS-Systems in Bezug auf die Achse $\overline{AM}$, welche durch die erste und letzte Rasterposition (*alpha* & *mike*) definiert ist (vgl. Abbildung 4.3).

Die Meßergebnisse zeigen keine nennenswerte vertikale Verschiebung des Meßtischs auf verschiedenen Rasterpositionen, jedoch sowohl eine horizontal lineare Verschiebung senkrecht zur Achse $\overline{AM}$ als auch eine unterschiedliche Verdrehung des Meßtischs. Die Werte der Abweichung von der Achse $\overline{AM}$ sind zwar mit maximal 0,8 mm und 2,8 mrad gering, können aber bei einer geforderten Positioniergenauigkeit von 0,1 mm nicht vernachlässigt werden.

Die Justierung der Feldmeßmaschine wird nun folgendermaßen durchgeführt. Die Mittelebene des Magneten (XZ -Ebene) wird horizontal ausgerichtet und die Strahlachse Z wird parallel zur Achse $\overline{AM}$ der Fahrminik eingerichtet. Da der Meßtisch ebenfalls horizontal justiert ist, stellen die Drehmatrizen einer jeden Rasterposition eine Drehung um die vertikale Achse beider Bezugssysteme dar und sind durch die gemessenen Drehwinkel bereits festgelegt. Daher muß lediglich noch der Translationsvektor T einer

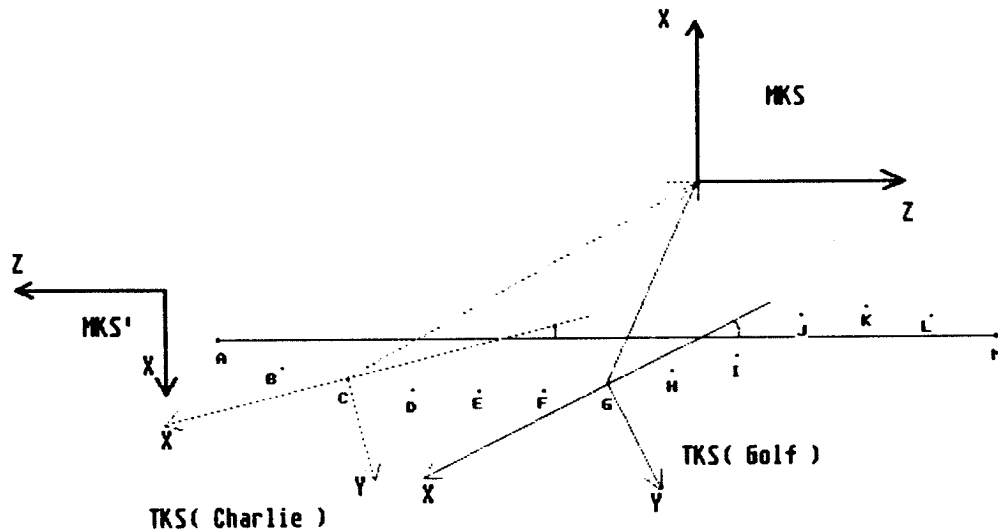


Abbildung 4.3: Räumliche Lage der Bezugssysteme von Meßobjekt (MKS) und Meßtisch (TKS). Die Rasterpositionen „Alpha“ und „Golf“ stehen für eine Justierung des Meßtischs zur Verfügung. Ein Meßobjekt kann daher in der Mitte der Fahrmitte (MKS-Bezugssystem) oder an deren Kopfende (MKS'-Bezugssystem) aufgebaut werden.

jeden Rasterposition bestimmt werden. Er braucht jedoch nur auf einer Rasterposition ermittelt zu werden, da sich die übrigen Translationsvektoren aus ihm und den gemessenen Rasterabständen errechnen.

Das Steuerprogramm führt für eine Justierung der Feldmeßmaschine drei Schritte aus. Zunächst wird durch einen Referenzlauf der Nullpunkt des TKS-Systems festgelegt. Danach wird der Meßtisch auf diejenige Rasterposition gestellt, von welcher aus der Ursprung des MKS-Systems mit dem Hallsondenträger angefahren werden kann. Hierfür muß zusätzlich die Hallsondenhalterung in der entsprechend markierten Steckposition sitzen.

In einem zweiten Schritt wird der Hallsondenträger parallel zu den Achsen des MKS-Systems ausgerichtet. Zu diesem Zweck besitzt der Hallsondenträger an der Anschlußseite ein Kardangelen (vgl. Abbildung 3.5). Die exakte Ausrichtung wird durch Anpeilen der Kanten des Hallsondenträgers mit einem Theodoliten überprüft. Es sind zwei mögliche Ausrichtungen des Hallsondenträgers im MKS-System vorgesehen. Während die Normale V_1 der ersten Hallsonde stets in die positive Y -Richtung des MKS-Systems weist, kann die Normale V_3 entweder in die positive X - oder Z -Richtung

des MKS-Systems weisen. Die gewählte Richtung wird dem Programm mitgeteilt, um die gemessenen Hallspannungen den korrekten Feldkomponenten zuordnen zu können.

Im letzten Schritt wird der vom TKS-Ursprung zum MKS-Ursprung weisende Translationsvektor auf der momentanen Rasterposition bestimmt. Hierfür lassen sich die Achsen des Meßtischs in jeder Richtung mit verschiedenen Schrittweiten auf Tastendruck verfahren. Dies geschieht solange, bis daß ein gut einsehbarer, frei wählbarer Referenzpunkt des Hallsondenträgers in den Ursprung des MKS-Systems bewegt wurde. Die Überprüfung geschieht wiederum mit einem Theodoliten. Nach Erreichen des Ursprungs wird die Tastatursteuerung beendet. Die aktuelle Position des Meßtischs wird daraufhin aus den Positionsregistern der CNC-Steuerung gelesen. Durch Angabe des Abstands des gewählten Referenzpunkts am Hallsondenträger zum Zentrum der dritten Hallsonde wird der ausgelesene Translationsvektor korrigiert. Die Abmessungen der drei Hallsondenträger finden sich im Anhang dieser Arbeit. Das Steuerprogramm berechnet nun die übrigen Translationsvektoren und speichert die vollständigen Transformationsparameter für jede einzelne Rasterposition (*alpha*, ..., *mike*) in einer gleichnamigen Datei ab.

4.4 Messung einer Feldkarte

Die für eine Feldmessung noch fehlenden Meßparameter wie die Wahl einer Meßtischposition, Setzen eines Erregungsstromes und Angabe des Meßbereichs sind unmittelbar im Meßmenü anzugeben. Sie ergänzen die weniger häufig zu variierenden Meßparameter des Menüs *Systemeinstellung*. Der Meßablauf wird ebenfalls im Meßmenü gestartet.

4.4.1 Wahl einer Meßtischposition

Der Meßtisch wird auf eine der dreizehn möglichen Rasterpositionen gesetzt. Die Überwurfmutter des Paßbolzens wird in der gewählten Fassung festgeschraubt. Dem Steuerprogramm wird lediglich der Name der gewählten Rasterposition mitgeteilt. Daraufhin werden die Transformationsparameter aus der bei der Justierung erzeugten, gleichnamigen Datei eingelesen. Ferner wird die Hallsondenhalterung in der gewünschten Steckposition angebracht. Dem Steuerprogramm wird diese Anordnung durch Angabe des in der Referenzbohrung befindlichen Paßtifts mitgeteilt. Der erreichbare Meßbereich am Meßobjekt kann dann vom Steuerprogramm berechnet wer-

den.

4.4.2 Setzen eines Erregungsstroms

Das Steuerprogramm besitzt grundsätzlich keine Schnittstelle für die Ansteuerung eines Netzgerätes, um die Anwendung des Programms nicht auf Magnete zu beschränken, die vom AEG-Netzgerät eines COSY-Dipols versorgt werden. Für diesen speziellen Fall existiert ein Betriebsprogramm, mit welchem u.a. ein fester Stromwert eingestellt werden kann. Wegen der Hystereseeigenschaft des Magnetfelds wird bei einer Feldmessung an einem COSY-Dipol ein Stromwert in Übereinstimmung mit dem Betriebszyklus von COSY eingestellt. Der Dipol wird mit einem Maximalstrom von 5000 A in die Sättigung gefahren. Von diesem definierten Ausgangspunkt wird der Strom auf 289 A gesenkt, welches der für die Injektion benötigten Feldstärke entspricht. Von dort wird der endgültige Stromwert eingestellt und dem Steuerprogramm **hall** einfach mitgeteilt.

4.4.3 Wahl des Meßbereichs

Der Meßbereich wird durch Angabe der Meßbereichsgrenzen und der Schrittabstände in allen drei Richtungen des MKS-Systems festgelegt. Die Eingaben erfolgen in der Einheit Millimeter. Das daraus resultierende Meßraster entspricht im allgemeinen Fall einem räumlichen Punktgitter, welches zu einer Ebene oder Geraden entartet, falls mehrere Meßbereichsgrenzen zusammenfallen. Die Komponenten des Magnetfeldes werden an den Gitterpunkten ermittelt. Die Eingabe des Meßbereichs unterliegt folgenden Beschränkungen :

- Schrittweiten von 0 mm sind ausgeschlossen
- die Untergrenze einer Richtung ist stets kleiner oder gleich ihrer Obergrenze
- die Meßbereichsgrenzen müssen mit der Schrittweite vereinbar sein
- die Schrittweite in derjenigen MKS-Achsenrichtung, welche mit der Normalen V3 der dritten Hallsonde zusammenfällt, darf nur 20 mm, 10 mm oder 5 mm betragen
- die maximal mögliche Obergrenze derjenigen MKS-Achsrichtung, welche mit der Normalen V3 der dritten Hallsonde zusammenfällt, muß mindestens um 40 mm kleiner gewählt werden

Bis auf den zuletzt genannten Punkt führt das Steuerprogramm eine Überprüfung des Meßbereichs im Hinblick auf diese Beschränkungen durch. Die beiden letzten Einschränkungen werden durch die Art des Meßablaufs erklärt. Das Punktgitter wird zeilenweise in derjenigen MKS-Achsrichtung abgefahren, die mit der Normalen V_3 der dritten Hallsonde zusammenfällt. Um dabei gleichzeitig alle Komponenten des Feldes zu messen, darf der Schrittabstand nur einen Teiler des Hallsondensbstands von 20 mm darstellen. Ferner muß der Hallsondenträger um 40 mm weiter als die angegebene Obergrenze dieser Fahrriichtung bewegt werden, damit dieser Grenzpunkt auch von der ersten Hallsonde noch vermessen werden kann. Wird die letzte Einschränkung außer Acht gelassen, so führt dies u.U. zum Anfahren des betreffenden Endschalters.

Das Steuerprogramm überprüft zusätzlich, ob der am Meßobjekt gewählte Meßbereich überhaupt von dem Meßtisch erreicht werden kann. Grundlage dieser Überprüfung bilden die im Menü *Systemeinstellung* angegebenen Positionen der zusätzlichen Endschalter sowie selbstverständlich der aktuelle Satz von Transformationsparametern. Bei zu groß gewähltem Meßbereich weist das Steuerprogramm den Benutzer auf die maximal zulässigen Meßbereichsgrenzen aller Achsrichtungen hin. Da die Bezugssysteme zueinander verdreht sind, führt die Einhaltung dieser Maximalgrenzen noch nicht notwendigerweise zu einem akzeptablen Meßraster. In der Praxis ist es jedoch nicht erforderlich, den maximalen Meßbereich auszunutzen, da die Abstände der Meßtischpositionen von 660 mm und der Paßstifte der Hallsondenhalterung mit 160 mm eine genügende Überlappung der maximalen Meßbereiche des Meßtischs auf benachbarten Meßtischpositionen gewährleistet.

4.4.4 Meßablauf

Nach Bereitstellung aller Meßparameter wird der Meßablauf vom Meßmenü aus gestartet. Der Inhalt der die folgende Messung charakterisierenden Parameterdatei *datahead* (vgl. Abschnitt 4.2.2.) wird unmittelbar vor Beginn der Messung angezeigt. Der Benutzer kann sich von der Richtigkeit der gewählten Meßparameter auf einen Blick hin überzeugen. Nach Bestätigung dieser Anzeige beginnt der Meßablauf.

Zunächst werden die für die Messung gewählten Einstellungen der Systemvoltmeter durchgeführt. Außer der Festlegung der Zahlenstellen der Meßwertanzeige und der Filtereinstellung wird der Meßwertspeicher dieser Geräte gelöscht. Sodann berechnet das Steuerprogramm aufgrund der Parameter des Meßbereichs die Menge aller zu vermessenden Raumpunkte.

Der Startpunkt der Messung ist durch die Untergrenzen des gewählten Meßbereichs definiert. Die Messung schreitet im Abstand der gewählten Schrittweiten in Richtung positiver MKS-Achsen fort. Das Meßraster wird dabei zeilenweise in der mit der Normalen V_3 der dritten Hallsonde zusammenfallenden MKS-Achsrichtung abgefahren. Eine spezielle Programmroutine sorgt dafür, daß bei einer gegebenen Position des Hallsondenträgers nur diejenigen Hallsonden einen Meßwert liefern, deren sensitives Zentrum sich momentan in einem Punkt des Meßrasters befindet. Der Hallsondenträger wird stets um 40 mm weiter als der Zeilenendpunkt des Meßrasters bewegt, um diesen auch noch mit der ersten Hallsonde vermessen zu können. Sollte die Zahl der Gitterpunkte die Speicherkapazität der Systemvoltmeter überschreiten, so erfolgt nach der letzten noch meßbaren Zeile ein Auslesen ihrer Meßwertspeicher und Abspeichern der Felddaten auf der Datenplatte des Rechners. Danach wird der Meßwertspeicher für die Aufnahme neuer Daten gelöscht und der Meßprozeß wird wieder aufgenommen. Eine Abspeicherung der Meßdaten erfolgt jedoch spätestens nach Beendigung des Meßprozesses. Die gemessenen Hallspannungen einer jeden Hallsonde werden dabei sofort mit dem zugehörigen Eichkoeffizientensatz in Magnetfeldgrößen in der Einheit Tesla umgerechnet.

Während des Meßprozesses können Kontrolleingriffe vorgenommen werden. Der Meßprozeß kann gestoppt werden. Es besteht dann die Möglichkeit des Abbruchs der Messung, die allerdings mit dem Verlust der bis dahin gemessenen Felddaten verbunden ist. Ebenso kann die Messung ohne jeden Datenverlust wieder fortgesetzt werden.

Eine zusätzliche *Scannerfunktion* erlaubt auf Wunsch die graphische Darstellung aller Feldkomponenten der jeweils zuletzt vermessenen Zeile des Meßrasters. Die betreffenden Graphiken bleiben ca. 10 s zur Ansicht auf dem Terminalmonitor erhalten. Der Meßprozeß wird hierdurch zwar nicht unterbrochen, aber stark verlangsamt. Diese Funktion ist daher nur im Bedarfsfall zur visuellen Kontrolle der Meßdaten anzuwenden und sollte im Sinne einer Feldmessung mit maximaler Geschwindigkeit ausgeschaltet sein. Nach jeder vermessenen Zeile des Meßrasters erhält der Benutzer zusätzlich eine Information über den genauen Stand der Messung. Die verbleibende Meßzeit sowie die aktuelle Zeile des Meßrasters werden angezeigt.

4.5 Auswertung der Meßdaten

Die Auswertung von Meßdaten mit dem Steuerprogramm *hall* bezieht sich auf eine Ermittlung der in Abschnitt 1.3 genannten Kenngrößen. Sie besteht daher einerseits in der Darstellung der absoluten und relativen Feld-

verteilung aller Feldkomponenten in verschiedenen Ebenen eines vermessenen Punktgitters, andererseits in der Berechnung von Integralen über gemessene Feldverteilungen zur Bestimmung der Ablenkstärke und effektiven Länge eines Magneten. Eine Polynomanpassung an zweidimensionale Werteverteilungen ermöglicht u.a. die Bestimmung einzelner harmonischer Anteile einer betrachteten Feldverteilung.

Die ausgewerteten Daten können in Form einer Tabelle oder Graphik dargestellt werden. Die Ausgabe ist sowohl auf dem Terminalmonitor als auch auf mehreren Ausgabegeräten wie Lineprinter, Laserdrucker und Farbplotter möglich.

Bei einer graphischen Darstellung werden die Meßwerte mit einem Linienzug verbunden. Sie selbst sind durch Symbole gekennzeichnet. Eine Legende informiert über die wichtigsten Parameter der dargestellten Meßgröße. Es können mehrere Feldverteilungen derselben Meßgröße entlang einer gewählten Achsrichtung gezeichnet werden. Ferner besteht die Möglichkeit, Ausschnitte einer Graphik in Vergrößerung zu betrachten. Eine Polynomanpassung kann in einem frei wählbaren Intervall für eine Feldverteilung durchgeführt werden. Der maximale Grad des anzupassenden Polynoms hängt von der Zahl der im Anpassungsintervall vorhandenen Meßwerte ab. Grundsätzlich jedoch sind Anpassungen nur bis zur 9. Ordnung durchführbar.

4.5.1 Wahl einer Feldkarte

Den Ausgangspunkt einer Datenauswertung bilden die im Verzeichnis *messdaten* befindlichen Rohdaten einer Feldmessung (vgl. Abschnitt 4.2). Durch Angabe eines Meßobjektnamens und eines Erregungsstroms wählt der Benutzer eine spezifische Feldmessung aus. I.a. besteht diese aus einer Serie von Einzelmessungen, die sich im Meßbereich voneinander unterscheiden. Die Einzelmessungen sind fortlaufend nummeriert. Der Benutzer wählt diejenigen Einzelmessungen aus, deren Meßbereiche sich zu einem Gesamtmeßbereich ergänzen. Das Steuerprogramm erleichtert die Wahl durch Anzeige der Meßbereiche aller Einzelmessungen.

In einem nächsten Schritt legt der Benutzer durch Angabe eines MKS-Achsenabschnitts fest, welche Ebene des gemessenen Punktgitters weiterhin betrachtet werden soll. Das Steuerprogramm verschafft sich dann die Felddaten der betreffenden Ebene aus der Menge der angegebenen Einzelmessungen. Ist die gewählte Ebene in einer der Einzelmessungen nicht enthalten, so erzeugt das Steuerprogramm eine Fehlermeldung und eine er-

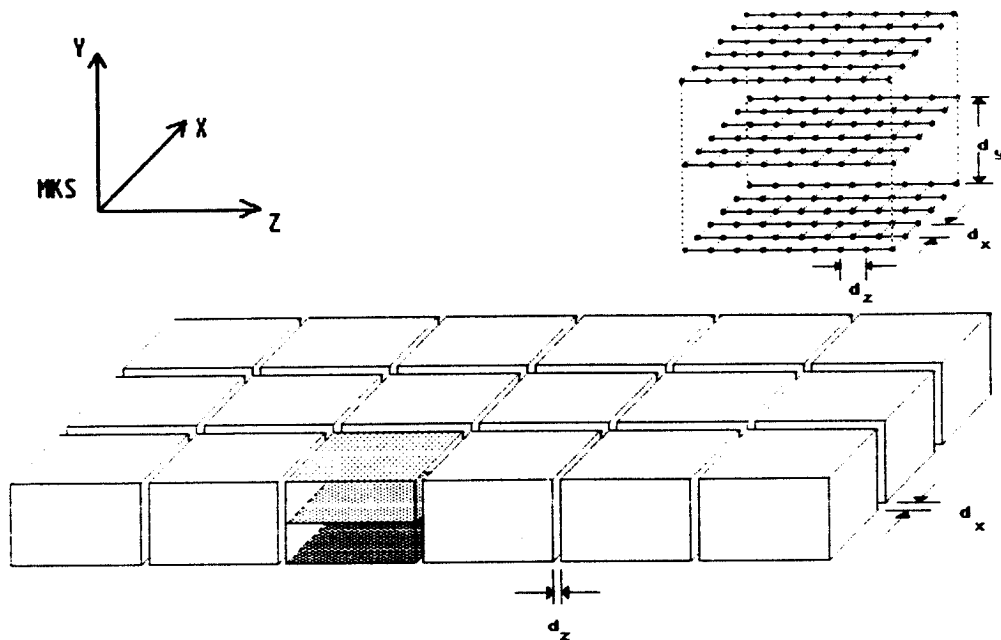


Abbildung 4.4: Eine Serie von Einzelmessungen mit unterschiedlichem Meßbereich setzt sich zu einer Gesamtfeldkarte zusammen. Das Punktgitter einer Einzelmessung ist exemplarisch dargestellt und sollte sich mit den Punktgittern aller übrigen Einzelmessungen zu einem Gesamtpunktgitter ergänzen.

neute Wahl der Einzelmessungen ist erforderlich. Die Abbildung 4.4 zeigt, wie sich die Meßbereiche einer Serie von Einzelmessungen sinnvollerweise zu einem Gesamtmeßbereich zusammensetzen. Die Abstände zwischen Meßbereichen benachbarter Einzelmessungen sollten der Schrittweite einer Einzelmessung entsprechen, um ein Gesamtpunktgitter mit äquidistanten Punktabständen in einer Raumrichtung zu erzeugen. Dieser Sachverhalt ist bereits bei der Konzeption einer Feldkartenmessung zu berücksichtigen.

4.5.2 Darstellung absoluter und relativer Feldverteilungen

Nach Wahl einer Ebene des Gesamtpunktgitters gibt der Benutzer eine in dieser Ebene darzustellende Meßgröße an. Die drei Komponenten des Magnetfeldes bzw. der Betrag des Gesamtfeldes können entweder absolut oder aber in Bezug zu einem gemessenen Feldwert dargestellt werden. Dieser Bezugswert der betrachteten Punktgitterebene wird durch Angabe seiner Koordinaten festgelegt.

Das Steuerprogramm ordnet die gewählte Meßgröße in der Form eines Zahlenfeldes an. Die Zeilen- und Spaltenbezeichnung ergibt sich aus den Koordinaten der vermessenen Punkte einer Ebene. Diese Darstellung entspricht unmittelbar der tatsächlichen räumlichen Beziehung der vermessenen Raumpunkte und vereinfacht daher die Übersicht über teilweise umfangreiche Datensätze. Feldwerte an Punkten von besonderem Interesse (z.B. Koordinatenursprung des MKS-Systems) lassen sich leicht auffinden.

Die tabellarische Darstellung wird durch die Angabe der Integralsummen einer jeden Zeile und Spalte des Zahlenfeldes ergänzt. Die Berechnung erfolgt nach der im folgenden Abschnitt 4.5.3 geschilderten Methode. Ferner werden der Tabelle die Meßparameter aller Einzelmessungen, aus denen die Tabelle erzeugt wurde, vorangestellt.

4.5.3 Bestimmung von Ablenkstärke und effektiver Länge

Eine integrale Auswertung der Feldverteilungen bezieht sich wiederum auf die zuvor gewählte Ebene eines Punktgitters. Es werden folgende Kenngrößen berechnet :

$$\begin{aligned}
 \text{A)} \quad & \int_a^c F dr \quad (s) \quad \text{linke Hälfte des Feldintegrals} \\
 \text{B)} \quad & \int_c^b F dr \quad (s) \quad \text{rechte Hälfte des Feldintegrals} \\
 \text{C)} \quad & \int_a^b F dr \quad (s) \quad \text{Gesamtfeldintegral} \\
 \text{D)} \quad & \frac{\int_a^c F dr - \int_c^b F dr}{\int_a^b F dr} \quad (s) \quad \text{Asymmetrie} \\
 \text{E)} \quad & \frac{\int_a^b F dr}{F|_{r=c}} \quad (s) \quad \text{effektive Länge}
 \end{aligned}$$

$$F) \quad \frac{\int_a^b F dr (s)}{\int_a^b F dr (s = d)} (s) \quad \text{Normierung}$$

Die integrierte Größe F repräsentiert eine der vier Feldgrößen B_x , B_y , B_z und B . Die Variablen r und s stehen stellvertretend für die beiden Raumrichtungen der gewählten Punktgitterebene. Der Benutzer wählt eine dieser Variablen als Integrationsvariable aus. Die Integrale werden dann als Näherungsintegrale 1. Ordnung über anzugebende Bereiche der Feldverteilung in Abhängigkeit der verbleibenden Ebenenvariablen angegeben.

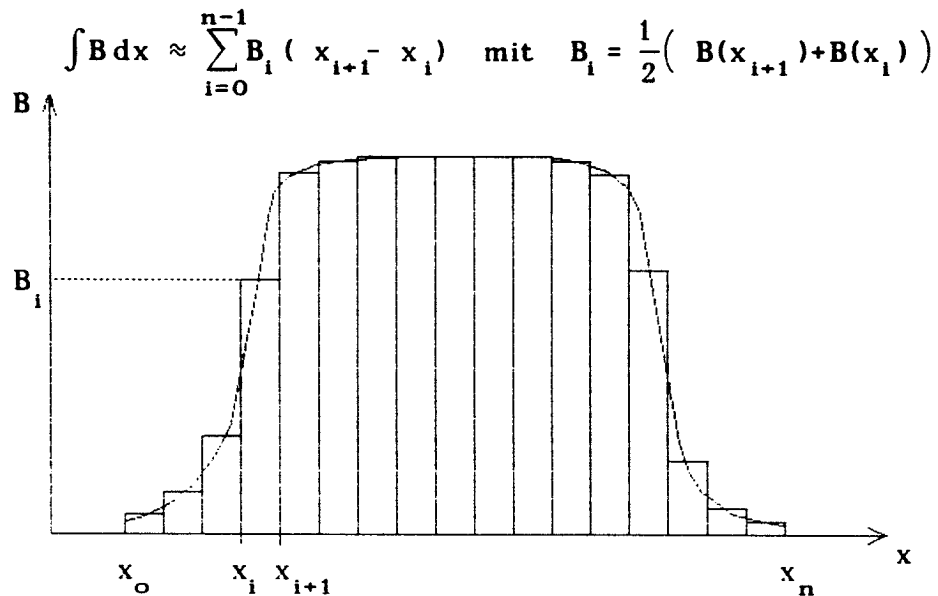


Abbildung 4.5: Die Feldintegrale werden in erster Näherung durch eine Summe über Rechtecksflächen dargestellt. Die Stützpunkte der Intervallteilung bilden die gemessenen Punkte des Gitters.

Die Abbildung 4.5 erläutert das numerische Verfahren zur Berechnung der Feldintegrale. Das Feldintegral wird durch eine Summe von Rechtecksflächen angenähert, deren Breite durch den Abstand benachbarter Gitterpunkte der Ebene und deren Höhe durch das arithmetische Mittel der Feldwerte benachbarter Gitterpunkte gegeben ist.

Die Integrationsgrenzen a und b legen den zu integrierenden Feldbereich fest. Ein Stützpunkt c unterteilt das Feldintegral in zwei Hälften. Durch Angabe eines Bezugspunktes $s = d$ wird ein Feldintegral bestimmt,

auf das alle übrigen Feldintegrale normiert werden können. Der Benutzer bestimmt die zu integrierende Feldgröße und die Integrationsparameter a , b , c und d . Die Integrationsparameter müssen sich auf vermessene Punkte der Ebene beziehen, da das Steuerprogramm hierfür keine Interpolation der Feldverteilung zwischen vermessenen Raumpunkten durchführt.

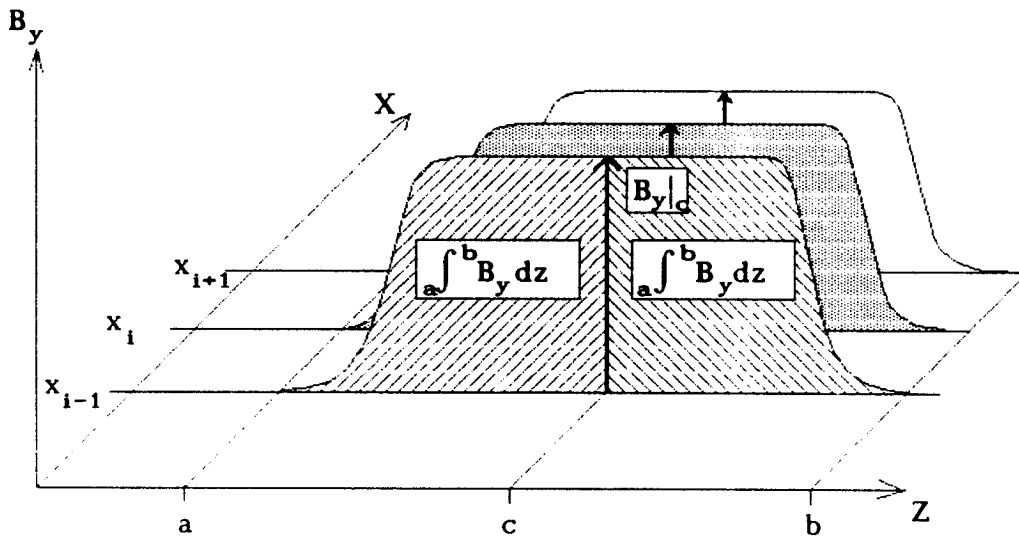


Abbildung 4.6: Bestimmung der Ablenkstärke, effektiven Länge und der magnetischen Mitte eines Dipols aus der Verteilung der Hauptfeldkomponente B_y in Strahlrichtung z .

Zur Erläuterung der Integrale

Die Summe der Integrale A und B ergibt das Gesamtfeldintegral C . Die Unterteilung des Feldintegrals in zwei Hälften gestattet einen direkten Vergleich der Anteile beider Hälften zum Gesamtfeldintegral. Dieser Sachverhalt wird ferner durch das Integral D beschrieben, welches die Differenz beider Hälften in Bezug zum Gesamtfeldintegral setzt. Diese Größe mag als Maß für die Asymmetrie eines Magneten dienen, sofern die Integrationsgrenzen den gesamten Feldbereich umfassen und die Bezugsgerade bei $r = c$ in einer Symmetrieebene des Magneten liegt.

Das Integral E stellt eine effektive Länge des Magneten dar, indem das Gesamtfeldintegral durch den Feldwert an der Stelle $r = c$ dividiert wird. Schließlich gibt das Integral F die Normierung aller Feldintegrale auf ein wählbares Bezugsintegral wieder.

In Abbildung 4.6 sind die Feldverteilungen der Hauptkomponente B_y

eines Dipolfeldes in Strahlrichtung z für mehrere transversale Achsenabschnitte x skizziert. Das Gesamtfeldintegral stellt dann die Ablenkstärke des Dipolmagneten dar. Die magnetische Mitte des Magneten ist durch denjenigen Achsenabschnitt $z = c$ definiert, welcher das Gesamtfeldintegral in gleiche Hälften teilt. Durch Variation des Achsenabschnitts läßt sich die Abweichung der magnetischen Mitte von der geometrischen Mitte des Dipols ermitteln.

4.5.4 Polynomanpassung

Im Rahmen einer graphischen Auswertung von Feldprofilen ist im Steuerprogramm **hall** die Möglichkeit einer Polynomanpassung vorgesehen. Das Anpassungsintervall und der Grad des Polynoms können frei gewählt werden. Es sind Anpassungen von maximal 9. Grad durchführbar. Die für die Berechnung des Polynoms benötigten Programmroutinen sind aus dem Werk [Bev 68] entnommen.

Der Polynomanpassung liegt die Methode der kleinsten Fehlerquadrate zugrunde. Bei vorgegebenem Polynomgrad n wird die Größe

$$\chi^2 = \sum_i \left(B_i - \sum_{k=0}^n c_k x^k \right)^2$$

minimiert. Die Summe erstreckt sich über die im gewählten Anpassungsintervall enthaltenen Meßwerte B_i der Feldverteilung. Die Größe χ^2 dient als Maß für die Güte der Anpassung und ist umso geringer, je besser die Werteverteilung durch das Anpassungspolynom wiedergegeben wird. Sie hängt sowohl von der Größe des Anpassungsintervalls als auch vom vorgegebenen Polynomgrad ab.

Die variabel gestaltete Polynomanpassung ermöglicht dem Programm-benutzer einerseits, sich rasch von der Größe der Feldgradienten im Streufeldbereich einer Feldverteilung zu informieren. Andererseits kann diese Möglichkeit zur Bestimmung von Multipolkoeffizienten genutzt werden. Von besonderem Interesse sind die harmonischen Anteile der Feldverteilung der Hauptfeldkomponente B_y in der X -Richtung senkrecht zur Strahlrichtung Z des Dipols in einer Umgebung der Strahlsollbahn (d.h. $x = 0$).

Betrachtet man die Entwicklung des skalaren Magnetpotentials Φ in kartesischen Koordinaten um den Ursprung des MKS-Systems, so gilt

$$\begin{aligned}
\Phi(x, y, z) &= \sum_{i,j,k} \frac{1}{i!} \frac{1}{j!} \frac{1}{k!} \left[\frac{\partial^{i+j+k} \Phi}{\partial x^i \partial y^j \partial z^k} \right]_{x=y=z=0} x^i y^j z^k \\
&\stackrel{\text{def}}{=} \sum_n \tilde{c}_n(y, z) x^n \\
B_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y} &= \sum_n \frac{\partial \tilde{c}_n}{\partial y} x^n \stackrel{\text{def}}{=} \sum_n c_n(y, z) x^n
\end{aligned}$$

Durch eine Polynomanpassung endlichen Grades werden die Multipolkoeffizienten $c_n(y, z)$ näherungsweise durch die Polynomkoeffizienten dargestellt. Sie werden der Legende einer Graphik beigelegt. Die Einheit des k -ten Koeffizienten wird in $\frac{\text{T}}{\text{mm}^k}$ angegeben. Das Anpassungspolynom wird zum Vergleich mit der Werteverteilung ebenfalls graphisch dargestellt.

Kapitel 5

Meßgenauigkeit und Meßergebnisse

In einem ersten Abschnitt dieses Kapitels wird die Meßgenauigkeit der Feldmeßmaschine untersucht. Mögliche Fehlerquellen sollen aufgezeigt und ihr Einfluß auf die Meßergebnisse diskutiert werden. Der zweite Abschnitt stellt die Ergebnisse einer Feldkartenmessung des COSY-Dipols MD01 bei einem Erregungsstrom von 4000 A dar. Sie werden u.a. im Hinblick auf die Fehlerquellen analysiert.

5.1 Meßgenauigkeit

Bei der Beschreibung der Komponenten der Feldmeßmaschine wurde bereits vereinzelt auf die Meßgenauigkeit Bezug genommen. In den folgenden Abschnitten soll sie im Zusammenhang dargestellt werden.

5.1.1 Positioniergenauigkeit

Die Positioniergenauigkeit der Feldmeßmaschine wird durch vier Faktoren bestimmt. Diese bestehen aus der Positioniergenauigkeit des 3-Achsen-Meßtischs, der Fahrmimik und der Hallsondenhalterung bei Versatz des GFK-Rohrs. Der vierte Faktor bildet die Unsicherheit, mit der der Koordinatenursprung des MKS-Systems bei einer Justierung der Feldmeßmaschine bestimmt werden kann.

Die Grundlage der Untersuchung der Positioniergenauigkeit von Meß-

tisch und Fahrminik bildet das Meßprotokoll [Krol 90]. Die Reproduzierbarkeit in der Positionierung des Meßtischs auf verschiedenen Rasterpositionen der Fahrminik sowie die Fahreigenschaften des Meßtischs selbst sind mit einem Laserinterferometer überprüft worden.

Die Genauigkeit, mit welcher der Meßtisch eine vorgegebene Position anfährt, wird einerseits durch die Fertigungstoleranzen der Antriebsspindeln und andererseits durch Zählfehler der Schritimpulse bestimmt. Bei der Überprüfung der Längsachse X des Meßtischs wurden Sollpositionen im Abstand von 20 mm zwischen 0 mm und 660 mm angefahren. Die Abweichungen von der Sollposition wurden im Vor- und Rücklauf der Tischachse bestimmt. Der Mittelwert dieser Abweichungen wächst annähernd linear mit der zurückzulegenden Fahrstrecke und beträgt maximal $\frac{13}{100}$ mm in Bezug auf die gesamte Fahrstrecke von 660 mm der X -Achse.

Das Umkehrspiel der Spindeln drückt sich in den unterschiedlichen Abweichungen von der Sollposition für Vor- und Rücklauf der Tischachse aus. Der Umkehrfehler beträgt jedoch maximal nur $\frac{2}{100}$ mm. Da überdies im Meßablauf die einzelnen Sollpositionen ohnehin aus der gleichen Richtung angefahren werden, kann der Umkehrfehler gegenüber dem absoluten Positionierfehler vernachlässigt werden.

Eine analoge Untersuchung wurde für die Reproduzierbarkeit in der Positionierung des Meßtischs auf verschiedenen Rasterpositionen der Fahrminik durchgeführt. Hierzu wurden zunächst die Abstände der einzelnen Rasterpositionen genau vermessen. Diese Abstandswerte werden bei der Ermittlung der Koordinatentransformation bei einer Justierung der Feldmeßmaschine berücksichtigt. Die maximale mittlere Abweichung, mit der diese Tischabstände reproduziert werden können, beträgt $\frac{2}{10}$ mm. Dabei ergab sich kein tendenzieller Unterschied der Abweichungen zwischen Vor- und Rückmessung. Vielmehr werden die Abweichungen dadurch bestimmt, auf welche Weise der Paßbolzen mittels der Überwurfmutter in die Fassung abgesenkt wird. Beim Fixieren der Mutter sollte der Paßbolzen möglichst koaxial über der Fassung sitzen.

Die Erweiterung des Meßbereichs der Y -Achse des Meßtischs geschieht durch Versatz des GFK-Rohrs um jeweils 160 mm. Die Abstände der Paßstifte sind mit einer Schieblehre überprüft worden. Obwohl die Bohrungen auf einer CNC-Werkbank ausgeführt wurden, ergibt sich für einzelne Paßstiftabstände eine maximale Abweichung von $\frac{5}{10}$ mm vom geforderten Sollabstand. Daraus resultiert eine ungenügende Übereinstimmung der Paßstiftabstände mit den Bohrungen der Rohrhalterung (vgl. Abbildung 3.4). Um Verspannungen des Rohrs beim Aufstecken auf die Rohrhalterung zu vermeiden, mußten einige der Paßstifte entfernt werden. Dies

erhöht jedoch andererseits die Empfindlichkeit des Rohrs gegenüber Verdrehungen um seine Achse für verschiedene Steckpositionen.

Bei Messungen innerhalb des Polspalts des Magneten ragt das Rohr notwendigerweise über das Ende der unterstützenden Leiste der Rohrhalterung hinaus. Der Durchhang des Rohrs ist für alle Steckpositionen ermittelt worden. Er beträgt maximal 5 mm, falls das Rohr um eine Strecke von 1100 mm über das Ende der Rohrhalterung hinausragt. Die Größe des Durchhangs wird als Korrektur in der Bestimmung der Koordinatentransformation berücksichtigt. Ein mehrfaches Umstecken des GFK-Rohrs hat gezeigt, daß die Größe des Durchhangs mit einer Genauigkeit von $\frac{2}{10}$ mm reproduzierbar ist.

Die Positioniergenauigkeit der Feldmeßmaschine wird weiterhin durch den Fehler bei der Bestimmung des Abstands der Ursprünge beider Koordinatensysteme bestimmt. Es handelt sich hierbei um einen systematischen Fehler, da er in die Berechnung der Transformationsdaten aller Meßtischpositionen in gleicher Weise eingeht. Das Anfahren des Koordinatenursprungs des MKS-Systems bei einer Justierung der Feldmeßmaschine (vgl. Abschnitt 4.3.3) wird mit einem Theodoliten überprüft. Dieser Raumpunkt kann mit einer Genauigkeit von $\frac{1}{10}$ mm in allen drei Raumrichtungen erreicht werden.

5.1.2 Winkelfehler

Für eine Messung der drei Komponenten eines Magnetfeldes mittels Hallsonden ist es erforderlich, daß sich die Normalen von drei genau senkrecht zueinander angeordneten Hallsonden zu jeder Zeit in Koinzidenz mit den Achsen des MKS-Systems befinden.

Die Abweichung von dieser Situation wird durch Winkelfehler beschrieben. Zunächst ergibt sich ein systematischer Winkelfehler bei der Herstellung der Sondenträger. Insbesondere sind die Hallsonden mit Klebstoff auf den Auflageflächen eines Hallsondenträgers fixiert. Eine unterschiedliche Schichtdicke des Klebstoffs führt zu geringfügigen Verkippen der Hallsonden aus ihrer Ideallage. Die Größe dieser Winkelfehler, die auf der Fertigung der Sondenträger beruhen, ist nicht untersucht worden. Sie tritt jedoch sicherlich hinter dem Winkelfehler bei der Ausrichtung des Sondenträgers in einem Magneten zurück.

Die Abbildung 5.1 zeigt schematisch die Anordnung der Hallsonden im homogenen Feld B_0 eines Dipols. Die Änderung der Normalenrichtung aller Hallsonden ist für kleine Drehungen um die Achsen $\overline{AB}$ bzw. $\overline{CD}$ darge-

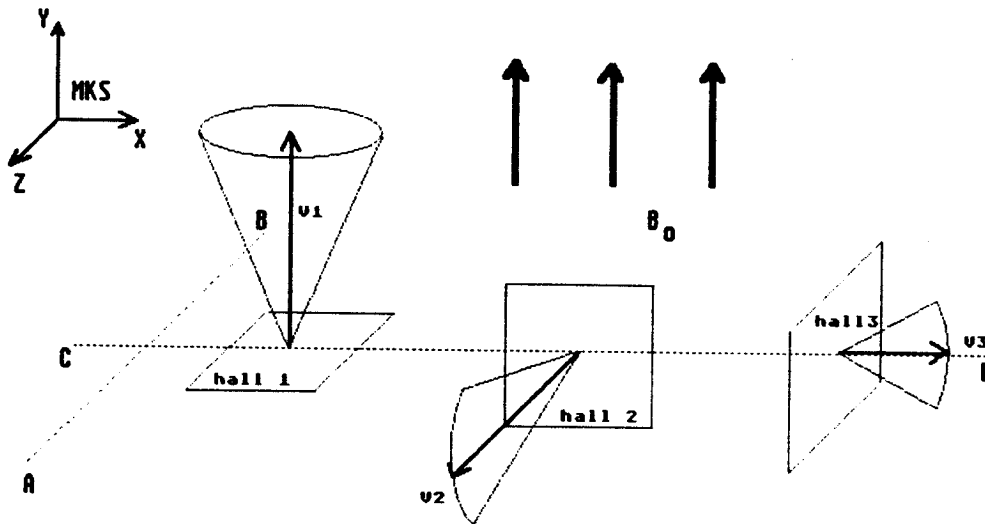


Abbildung 5.1: Anordnung der Hallsonden in einem homogenen Dipolfeld. Geringe Drehungen um die Achsen $\overline{AB}$ bzw. $\overline{CD}$ führen rasch zu großen Fehlern in der Bestimmung der transversalen Feldkomponenten, während die Bestimmung der Hauptkomponente davon unbeeinflusst bleibt.

stellt. Die Hallsonden messen jeweils die Projektion des Feldes B_0 auf ihre Normalenrichtungen. Das gemessene Feld der Sonde *hall 1* variiert für beide Drehrichtungen mit dem *Kosinus* des Drehwinkels und ist daher recht unempfindlich gegenüber Verdrehungen (eine Abweichung des Meßwertes von nur 10^{-4} des Hauptfeldes erfordert bereits einen Drehwinkel von $0,8^\circ$). Hingegen ändert sich das gemessene Feld der übrigen Hallsonden mit dem *Sinus* des Drehwinkels. Dieser Umstand wirkt sich besonders nachteilig in der Bestimmung der transversalen Komponenten B_x und B_z des Magnetfelds aus, da sie in einem Dipolfeld gegenüber der Hauptfeldkomponente B_y nur eine geringe Meßgröße darstellen.

Die genannten Winkelfehler sind bei einer Ausrichtung des Hallsondenträgers unvermeidbar und in ihrer Größe nur schwer abschätzbar. Man erwartet daher in der Feldverteilung der transversalen Feldkomponenten qualitativ den gleichen Feldverlauf wie er für die Hauptkomponente B_y des Feldes besteht. Insbesondere treten spontane Änderungen des Winkelfehlers bei Versatz des Meßtischs und des GFK-Rohrs auf, die sich als Diskontinuitäten im Feldverlauf bemerkbar machen. In der Mittelebene eines idealen Dipolmagneten sollten die transversalen Feldkomponenten verschwinden. Das Verhältnis der transversalen Feldkomponenten zum Hauptfeld

gibt in der Mittelebene daher unmittelbar Aufschluß über die Größe der vorhandenen Winkelfehler einer Messung.

5.1.3 Auflösung der Hallsonde

Die Ortsauflösung der Hallsonde ist der minimale räumliche Abstand, in dem noch Felder an verschiedenen Orten gemessen werden können. Da die Hallsonde Feldkomponenten in Richtung ihrer Normalen mißt, ist die Ortsauflösung der Hallsonde durch die Schichtdicke von 0,1 mm gegeben (vgl. Anhang 6.2.2.). Das gemessene Feld stellt einen Mittelwert über das Probenvolumen der Sonde dar.

Die Felddauflösung der Hallsonde besteht in dem minimalen, von der Sonde noch meßbaren Feldunterschied. Das Datenblatt zur Sonde SBV 601-S1 [Siem] gibt über die Auflösung der Hallsonde keine Auskunft. Sie liegt jedoch typischerweise im Bereich 10^{-5} – 10^{-4} T. Betrachtet man die in Abbildung 5.9 dargestellten, gemessenen Feldverteilungen von B_z entlang der Z-Richtung des COSY-Dipols MD01 für verschiedene Achsenabschnitte X , so erkennt man eine charakteristische Schwankung der Feldverteilung. Der qualitative Verlauf dieser Schwankung ist für verschiedene Achsenabschnitte gleich, so daß er nicht auf zufällige Fehler bei der Feldbestimmung zurückgeführt werden kann. Die Amplitude dieser Schwankung von etwa 5×10^{-5} T gibt einen Anhaltspunkt für die Felddauflösung der verwendeten Hallsonde.

5.1.4 Fehler in der Magnetfeldmessung

Die Fehler in der Bestimmung eines Feldwertes mittels Hallsonden basieren prinzipiell auf den Stromschwankungen des Steuerstroms, der Temperaturabhängigkeit der Hallkonstanten und der Meßgenauigkeit der Systemvoltmeter.

Die Konstanz des Steuerstroms der Konstantstromquelle von Siemens ist in einem Langzeitversuch über 4 h mit einem der Systemvoltmeter überprüft worden. Es wurde alle 30 s ein Meßwert des Gleichstroms bei maximaler Empfindlichkeitseinstellung des Meßgeräts aufgenommen. Der Mittelwert dieser Serie von Meßwerten wurde mit 199,998 mA notiert. Die Varianz der Meßwertverteilung ergab sich zu 0,002 mA und liegt damit nahe an der Eingangsempfindlichkeit von 0,001 mA des Meßgeräts. Die relative Schwankung des Steuerstroms beträgt damit 1×10^{-5} und ist gegenüber der Felddauflösung der Hallsonde zu vernachlässigen.

Der Temperaturkoeffizient des Hallwiderstands ist mit $\vartheta = 0,2\%/K$ im Bereich zwischen 0 und 100°C angegeben. Die Hallspannung weist demnach eine lineare Temperaturabhängigkeit von der Form

$$U = U_0 + \vartheta U$$

auf. Für kleine Änderungen der Hallspannung aufgrund von Temperaturdrift ergibt sich eine relative Schwankung von $\frac{\Delta U}{U} = 2 \times 10^{-3}/K$. Wegen der fast linearen Beziehung zwischen Hallspannung und Magnetfeld ergibt sich eine relative Schwankung des Magnetfeldes dergleichen Größe. Wird die Temperatur auf 0,1 K konstant gehalten, so ist die relative Schwankung des Magnetfeldes $\leq 2 \times 10^{-4}$.

Der absolute Fehler bei der Spannungsmessung mit den Systemvoltmetern setzt sich aus einem Bruchteil des angezeigten Meßwerts und einem Zählfehler auf der letzten angezeigten Zahlenstelle zusammen [Schlum 88]. Im relevanten Nennbereich von 200 mV beträgt er bei zugeschaltetem Filter und einer Einstellung von 6 bzw. 7 angezeigten Zahlenstellen

$$\Delta U = 7 \times 10^{-6}U + 5 \times 10^{-6}\text{V} \quad (\text{digits}=6)$$

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

Da die Eichkurve für Magnetfeld und Hallspannung in guter Näherung linear verläuft, sind die relativen Fehler beider Größen gleich. Legt man einen linearen Eichkoeffizienten von $3.33 \times 10^{-5} \frac{\text{T}}{\mu\text{V}}$ zugrunde [Sage 88], so läßt sich der relative Fehler $\frac{\Delta B}{B}$ als Funktion des Feldes B darstellen.

Die Abbildung 5.2 gibt diesen Verlauf wieder. Zusätzlich ist der relative Fehler aufgrund einer Feldauflösung von $5 \times 10^{-5} \text{ T}$ der Hallsonde dargestellt. Man erkennt, daß der relative Fehler der Systemvoltmeter nur bei maximaler Empfindlichkeitseinstellung unter den Meßfehler der Hallsonde aufgrund endlicher Feldauflösung gedrückt werden kann. Diese Einstellung ist wegen zu langer Meßzeiten jedoch nicht brauchbar. Damit wird der relative Fehler der Feldmessungen im wesentlichen durch die Genauigkeit der Systemvoltmeter bestimmt.

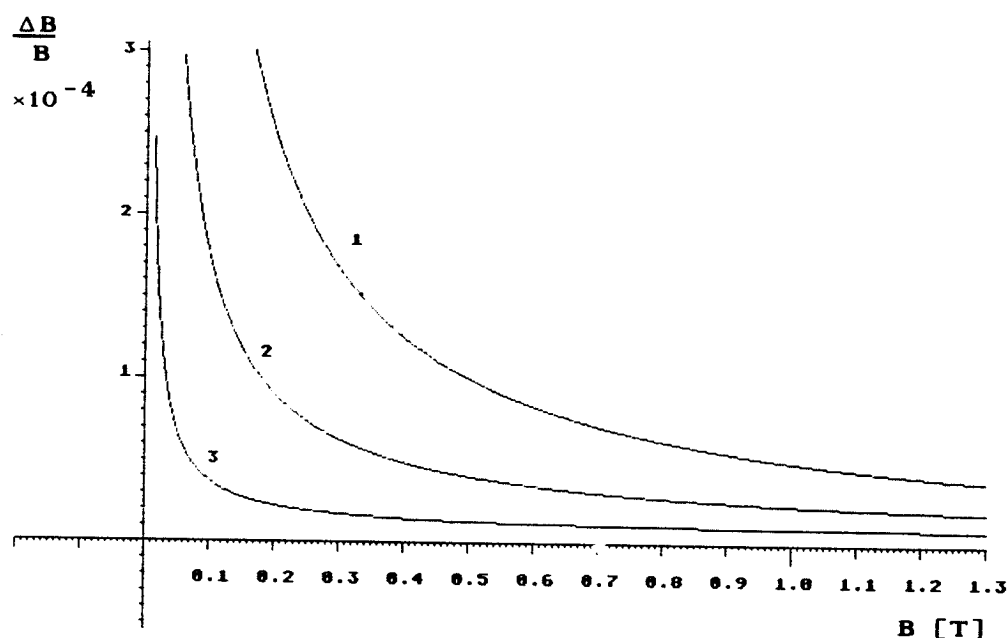


Abbildung 5.2: Relativer Fehler $\frac{\Delta B}{B}$ als Funktion des Magnetfeldes für (1) 6-Zahlenstellengenauigkeit bzw. (3) 7-Zahlenstellengenauigkeit der Systemvoltmeter und (2) als Folge einer Feldaufösung von 5×10^{-5} T einer Hallsonde.

5.1.5 Fehler der Kenngrößen des Magnetfeldes

Die Auswirkungen der Feld- und Positionierfehler auf die Bestimmung der relativen Feldverteilung, der Ablenkstärke und der effektiven Länge sollen kurz analysiert werden.

Betrachtet man die relative Feldverteilung $\frac{\Delta B}{B} = \frac{B - B_0}{B_0}$ im relevanten, homogenen Feldbereich des Magneten, so gilt in der Nähe des Referenzfeldes B_0 die Näherung $B \approx B_0$. Damit gilt für den relativen Fehler der relativen Feldverteilung

$$\begin{aligned} \frac{\Delta r}{r} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B_0}{B_0}\right)^2} \quad \text{mit} \quad r = \frac{B - B_0}{B_0} \\ &\approx \sqrt{2} \frac{\Delta B}{B} \end{aligned}$$

Legt man den relativen Fehler der Induktion B aus Abschnitt 5.1.4

zugrunde, so stellt Abbildung 5.2 bis auf den Faktor $\sqrt{2}$ den relativen Fehler in der relativen Feldverteilung als Funktion der Induktion B dar.

Die Ablenkstärke berechnet sich nach 4.5.3. mit $B = B_y$ näherungsweise zu

$$\int B_y dz = \sum_{i=0}^{n-1} B_y^{(i)} (z_{i+1} - z_i)$$

mit $B_y^{(i)} = \frac{1}{2} (B_y(z_{i+1}) + B_y(z_i))$

Für eine Intervallteilung konstanter Breite b läßt sich diese Beziehung schreiben als

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \int B_y dz = \sum_{i=0}^{n-1} b B_y(z_i) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=0}^{n-1} A_i$$

da $B_0 = B_n$ für eine symmetrische Feldverteilung in guter Näherung erfüllt ist. Im folgenden soll nur der Fehler der Ablenkstärke als Folge von Positionier- und Feldfehler betrachtet werden. Für den relativen Fehler eines jeden Flächenelements A_i gilt :

$$\frac{\Delta A_i}{A_i} = \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B_i}{B_i}\right)^2}$$

Beträgt der absolute Positionierfehler auf eine Fahrstrecke von 660 mm des Meßtischs $\Delta s = 0,1$ mm, so ergibt sich für eine typische Intervallbreite von $b = 20$ mm ein Fehler von $\Delta b = \frac{\Delta s}{\sqrt{33}} = 0,017$ mm, da sich die Gesamtstrecke aus 33 Intervallen zusammensetzt. Legt man wiederum den relativen Fehler der Induktion B aus 5.1.4 zugrunde, so ergibt sich der in Abbildung 5.3 dargestellte relative Fehler eines einzelnen Flächenelements als Funktion der Induktion B .

Der konstante Beitrag aufgrund des Positionierfehlers ist separat gezeichnet. Er dominiert den relativen Fehler des Flächenelements über einen großen Feldbereich von 0,1 T bis 1,3 T. Vernachlässigt man den Feldfehler gegenüber dem Positionierfehler (d.h. $\frac{\Delta A_i}{A_i} \approx \frac{\Delta b}{b}$), so ergibt sich wegen

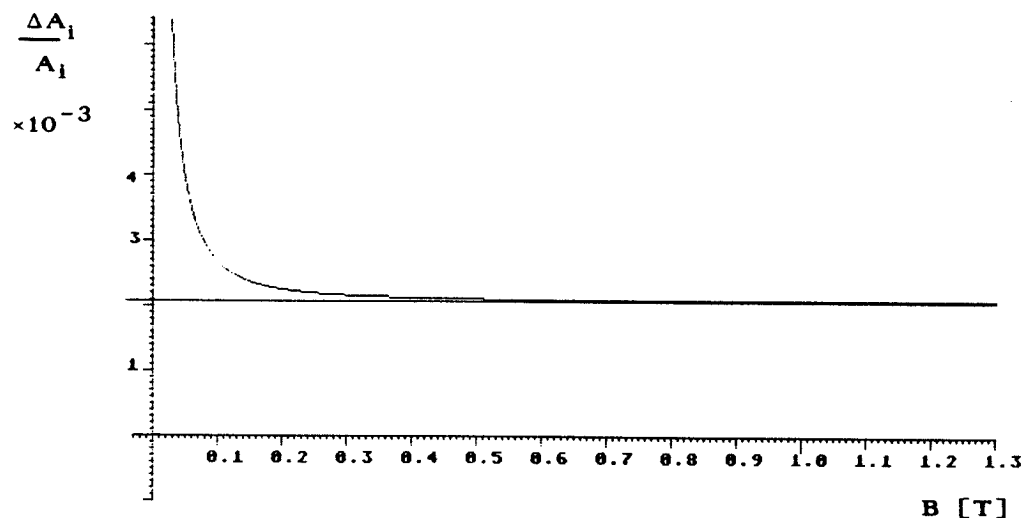


Abbildung 5.3: Relativer Fehler eines Flächensegments A_i in Abhängigkeit der Induktion B .

$$(\Delta A)^2 = \sum_{i=0}^{n-1} (\Delta A_i)^2 = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{\Delta A_i}{A_i} \right)^2 A_i^2 = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{\Delta b}{b} \right)^2 A_i^2$$

die Beziehung für den relativen Fehler der Ablenkstärke zu

$$\left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 = \left(\frac{\Delta b}{b} \right)^2 \frac{\sum A_i^2}{(\sum A_i)^2} = \left(\frac{\Delta b}{b} \right)^2 \frac{\sum B_i^2}{(\sum B_i)^2}$$

Die Summation ist über die Werte B_i der gemessenen Feldverteilung zu erstrecken. Der relative Fehler der effektiven Länge l_{eff} ergibt sich wegen $A = B_0 l_{eff}$ hieraus unmittelbar zu

$$\frac{\Delta l_{eff}}{l_{eff}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\Delta B_0}{B_0} \right)^2}$$

5.2 Meßergebnisse

Die folgenden Meßergebnisse beziehen sich auf eine Feldkartenmessung des COSY-Dipols MD01 bei einem Erregungsstrom von 4000 A. Der gesamte Meßbereich setzt sich aus drei Ebenen bei $Y = 0$ mm und $Y = \pm 25$ mm zusammen. Jede dieser Ebenen wurde in einem 20 mm Raster zwischen den Grenzen $Z_0 = -1680$ mm und $Z_1 = +1680$ mm bzw. $X_0 = -680$ mm und $X_1 = +120$ mm vermessen. Hierfür mußte der Meßtisch entlang der Strahlrichtung Z des Dipols sechsmal und die Meßsondenhalterung in X -Richtung fünfmal versetzt werden. Die Daten der Feldkarte sind somit das Resultat von 30 Einzelmessungen. Die folgende Tabelle gibt für beide horizontalen Richtungen X und Z die Grenzen der Einzelmeßbereiche an :

Feldkartenmeßbereich			
<i>X-Richtung</i>		<i>Z-Richtung</i>	
-680 mm	-540 mm	-1680 mm	-1040 mm
-520 mm	-380 mm	-1020 mm	-440 mm
-360 mm	-220 mm	-420 mm	+160 mm
-200 mm	-40 mm	+180 mm	+740 mm
-20 mm	+120 mm	+780 mm	+1360 mm
		+1380 mm	+1680 mm

Die in den Abbildungen 5.4–5.14 dargestellten Feldverteilungen in der Mittelebene des Magneten müssen im Hinblick auf diese Meßbereichseinteilung studiert werden. In einigen dieser Abbildungen sind zusätzlich die Lage der Eisenkanten sowie Hauptspulen eingezeichnet.

Zunächst zeigen die Abbildungen 5.4–5.6 die Feldverteilung der Hauptkomponente B_y in X - und Z -Richtung für mehrere Achsenabschnitte Z bzw. X . Die Hauptkomponente erreicht im annähernd homogenen Feldbereich einen Maximalwert von 1,63 T und ist bei einem Abstand von $X = -220$ mm bereits auf die Hälfte ihres Maximalwertes abgefallen. Dieser Punkt liegt 5 mm außerhalb der Eisenkante des Magneten. In einer Entfernung von $X = -680$ mm sinkt die Hauptkomponente schließlich auf einen Wert $\leq 0,01$ T.

Die Abbildung 5.6 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Feldverteilung der Hauptkomponente in X -Richtung. Für diese Verteilung ist in einem Intervall von $X = \pm 120$ mm ein Polynom 6. Grades angepasst worden. Aus den Koeffizienten dieses Polynoms ergeben sich an dieser Stelle die Multipolkoeffizienten zu

Multipolkoeffizienten		
Dipolanteil	: $c_0 = 1,631$	T
Quadrupolanteil	: $c_1 = 1,811 \times 10^{-6}$	$\frac{\text{T}}{\text{mm}}$
Sextupolanteil	: $c_2 = -5,579 \times 10^{-7}$	$\frac{\text{T}}{\text{mm}^2}$
Oktupolanteil	: $c_3 = -4,832 \times 10^{-10}$	$\frac{\text{T}}{\text{mm}^3}$
Dekapolanteil	: $c_4 = 4,554 \times 10^{-11}$	$\frac{\text{T}}{\text{mm}^4}$

Es treten neben den erlaubten Dipol-, Sextupol- und Dekapolanteilen auch ein Quadrupol und Oktupolanteil auf. Dies begründet sich in der durch die C-Form gegebenen, asymmetrischen Bauweise des Dipols mit einseitigem Rückflußjoch.

In Abbildung 5.7 ist die relative Feldverteilung der Hauptkomponente in x -Richtung dargestellt. Zwar sind in der Umgebung $x = 0$ mm aufgrund der gewählten Rastereinteilung von 20 mm nicht viele Meßwerte enthalten, jedoch zeigt sich im nutzbaren Feldbereich von $x = \pm 30$ mm, daß selbst bei Feldern $\geq 1,58$ T die Bedingung $\frac{\Delta B}{B} \leq 2 \times 10^{-4}$ noch recht gut erfüllt ist.

Die Abbildungen 5.8–5.11 stellen die Feldverteilungen der transversalen Feldkomponenten B_x und B_z in der Mittelebene dar. Nach den Erläuterungen aus Kapitel 2 sollten sie hier bei einem idealen Dipol verschwinden. Tatsächlich spiegelt sich in diesen Komponenten der Feldverlauf der Hauptfeldkomponente wieder. Dies deutet auf Winkelfehler bei der Ausrichtung des Hallsondenträgers hin. Ferner ergeben sich Sprünge in den Feldverteilungen an denjenigen Stellen, wo die Meßbereiche der Einzelmessungen aneinandergrenzen. Diese spontanen Winkelfehler werden beim Versatz des Meßtisches und der Meßsondenhalterung erzeugt.

Bei einem Hauptfeld von 1,63 T entspricht der Sprung von ca. 0,02 T in der Feldkomponente B_z bei $x = -20$ mm einer Drehung von $0,7^\circ$ um die Längsachse der Meßsonde (vgl. Abbildung 5.8). Ferner weist der Meßwert von $B_z \sim 0,03$ T im Bereich $-20 \text{ mm} \leq x \leq +120 \text{ mm}$ (dies ist der bei der Justierung der Feldmeßmaschine erreichbare X -Bereich) auf einen Winkelfehler von $1,1^\circ$ um die Längsachse der Sonde hin.

Ein direkter Vergleich mit den in Abbildung 5.10 gezeigten Feldverlauf der B_x -Komponente ergibt, daß bei Versatz der Hallsondenhalterung auch eine spontane Winkeländerung um die Querachse des Sondenträgers auftritt. Mit dem Sprung von 0,003 T errechnet sich in Bezug auf das Hauptfeld von 1,63 T ein Winkelfehler von $0,1^\circ$. Er ist damit um eine Größenordnung geringer als Winkelfehler der Längsachse.

Die Abbildung 5.11 stellt den Verlauf der B_x -Komponente in Strahlrichtung des Magneten dar. Der Versatz des Meßtischs äußert sich ebenfalls als Sprung in der gemessenen Feldverteilung. Die Größe der Sprünge von etwa 3×10^{-4} T sind jedoch weitaus nicht so gravierend wie die durch einen Versatz der Meßsondenhalterung auftretenden Sprünge.

Die Abbildungen 5.12 und 5.13 zeigen schließlich die Ablenkstärke und effektive Länge des Magneten für mehrere Achsenabschnitte x . Die Normierung der Ablenkstärke auf den bei $x = 0$ mm ermittelten Wert ist in Abbildung 5.14 wiedergegeben. Innerhalb des Bereichs $-30 \text{ mm} \leq x \leq +30 \text{ mm}$ zeigt sich eine relative Abweichung $\leq 5 \times 10^{-4}$ vom Bezugswert.

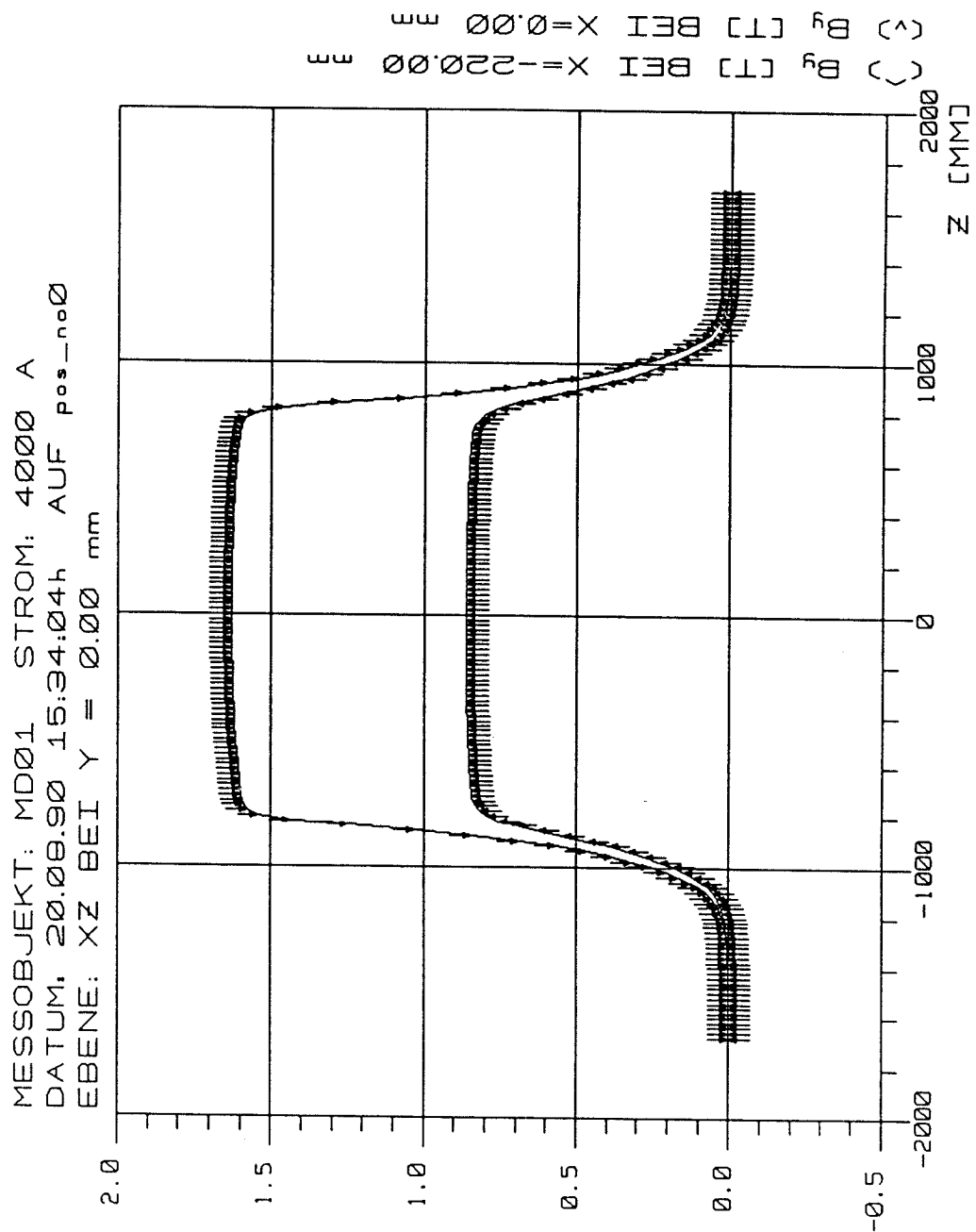
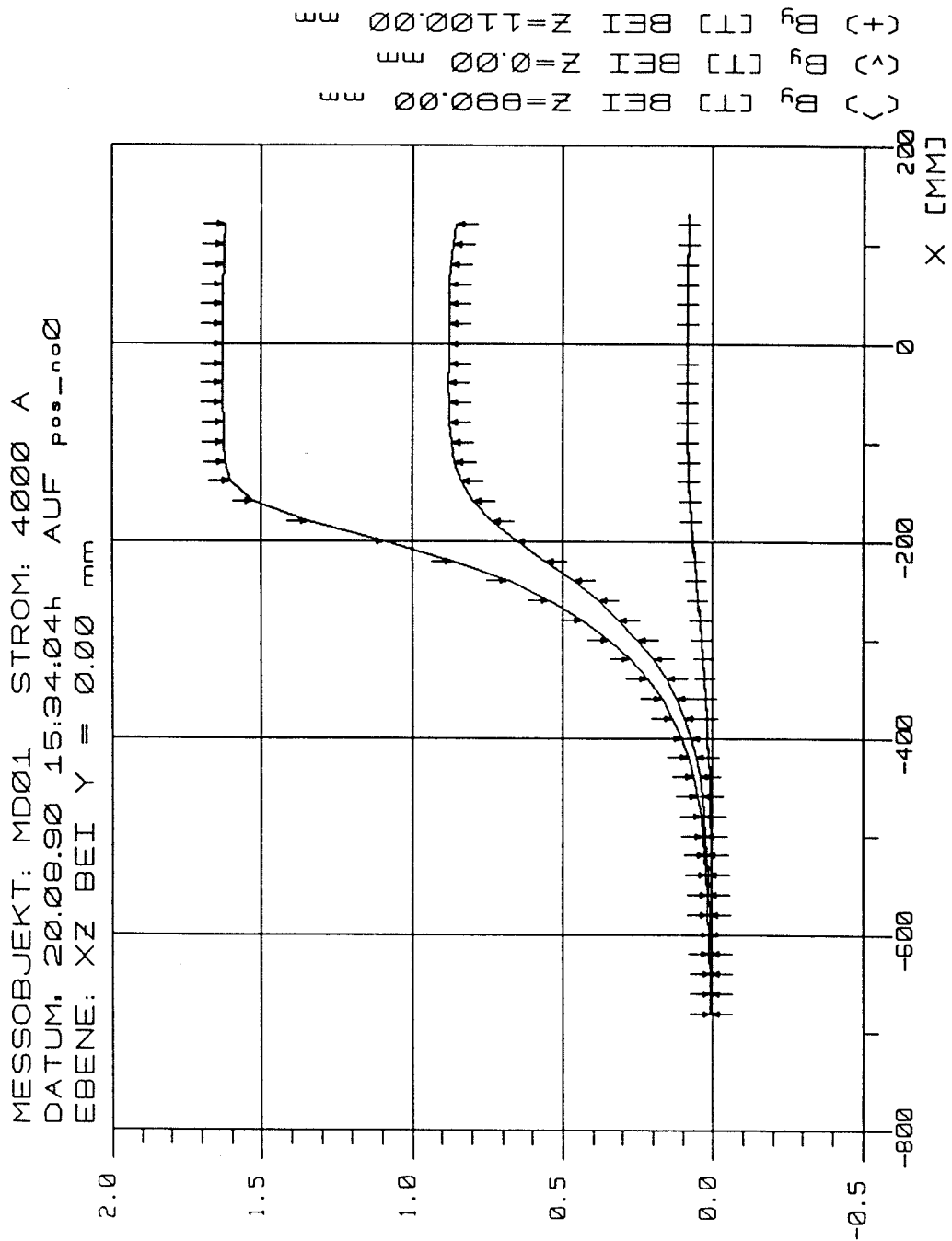
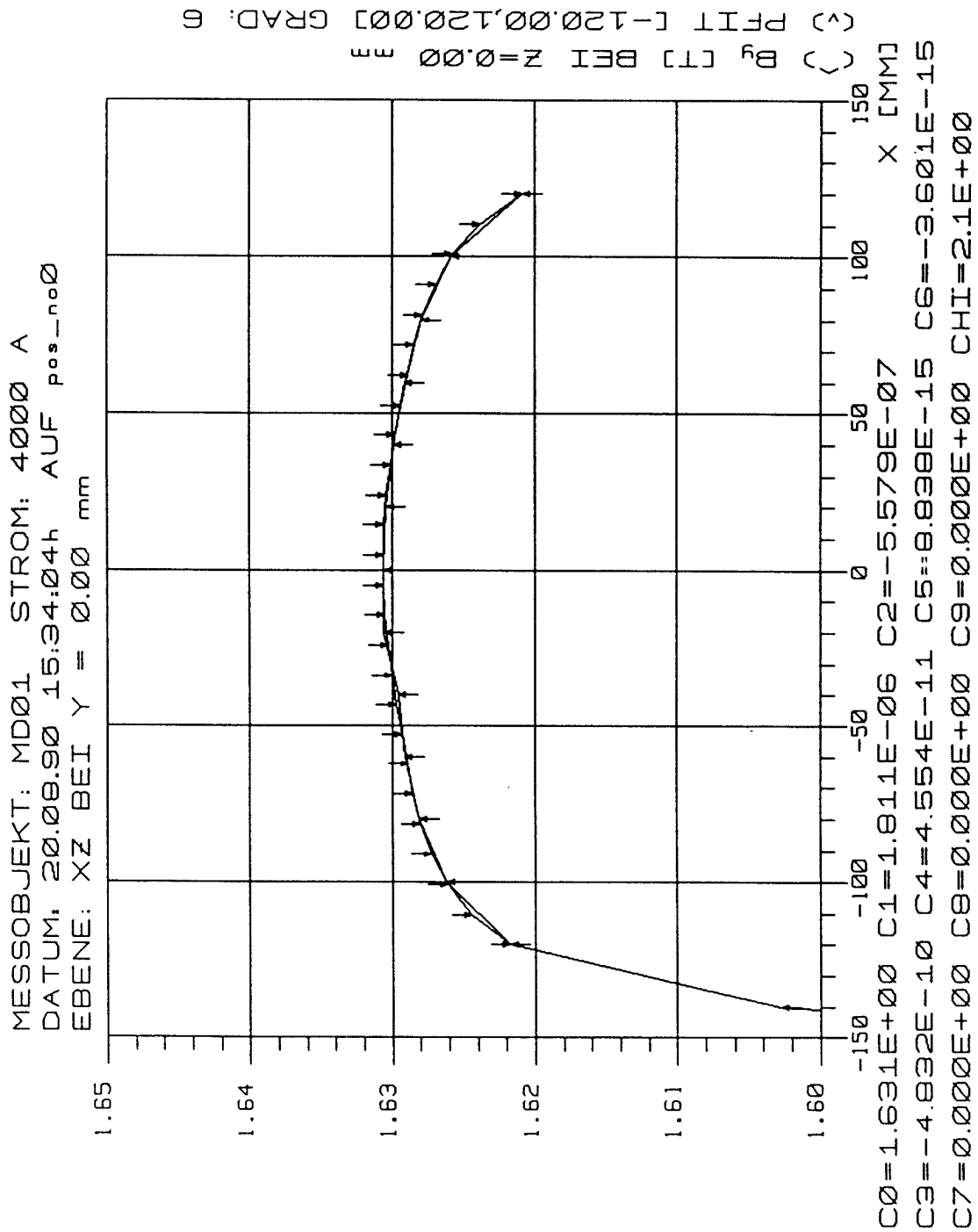


Abbildung 5.4: Feldverteilung der Hauptkomponente B_y in Strahlrichtung Z


 Abbildung 5.5: Feldverteilung der Hauptkomponente B_y in X-Richtung

Abbildung 5.6: Feldverteilung der Hauptkomponente B_y in X-Richtung

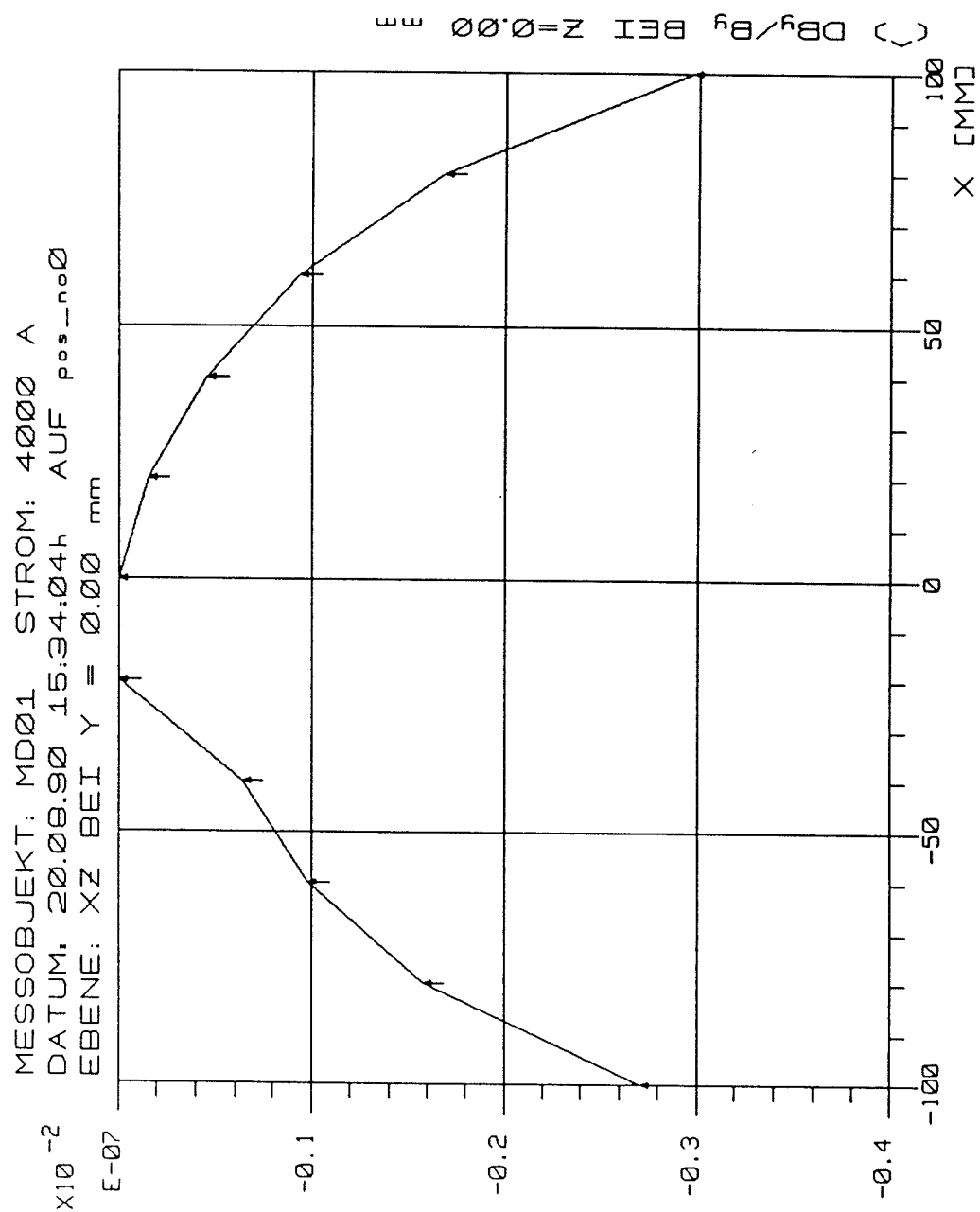


Abbildung 5.7: Relative Feldverteilung der Hauptkomponente B_y in X-Richtung

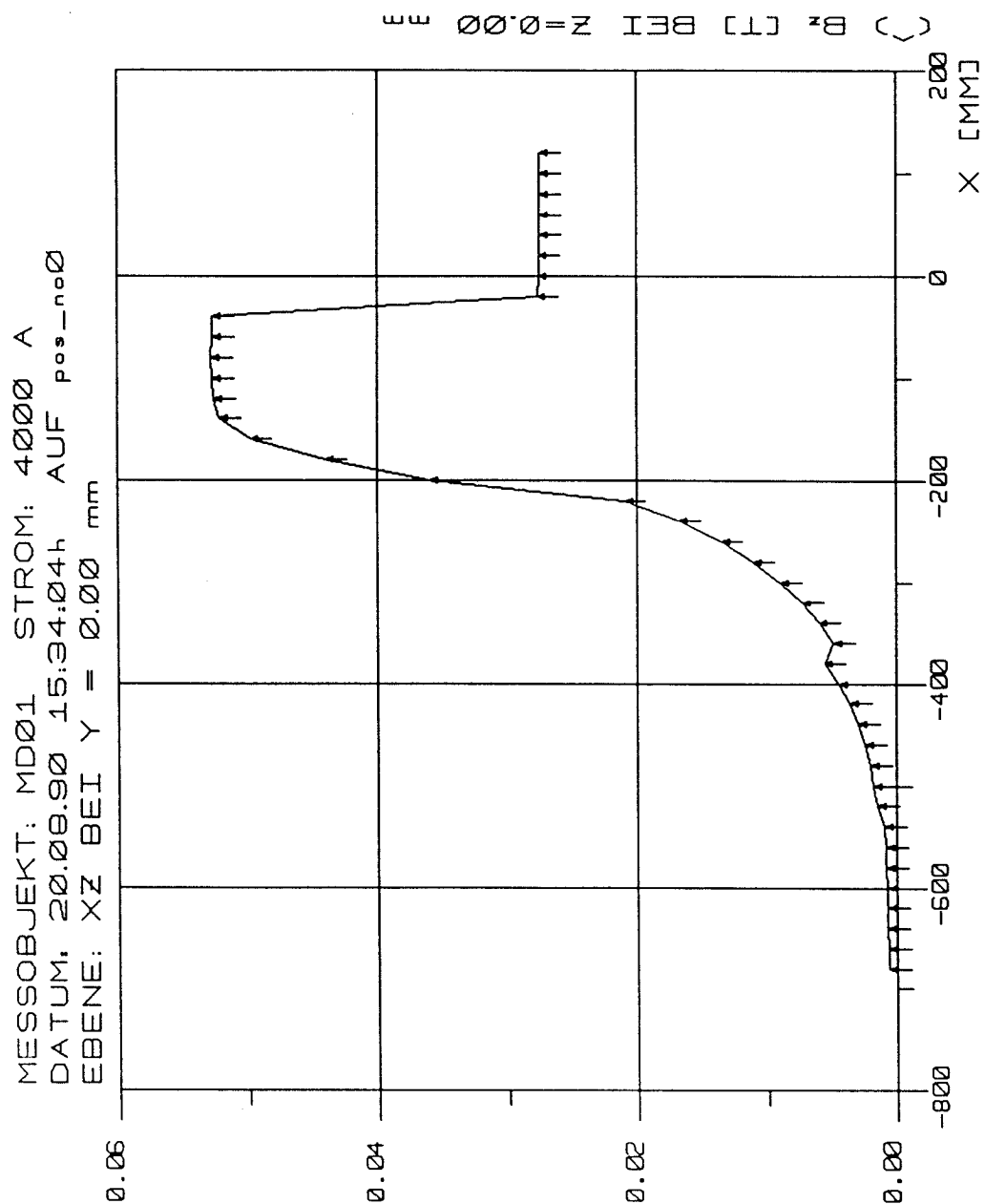


Abbildung 5.8: Feldverteilung der transversalen Feldkomponente B_z in X-Richtung

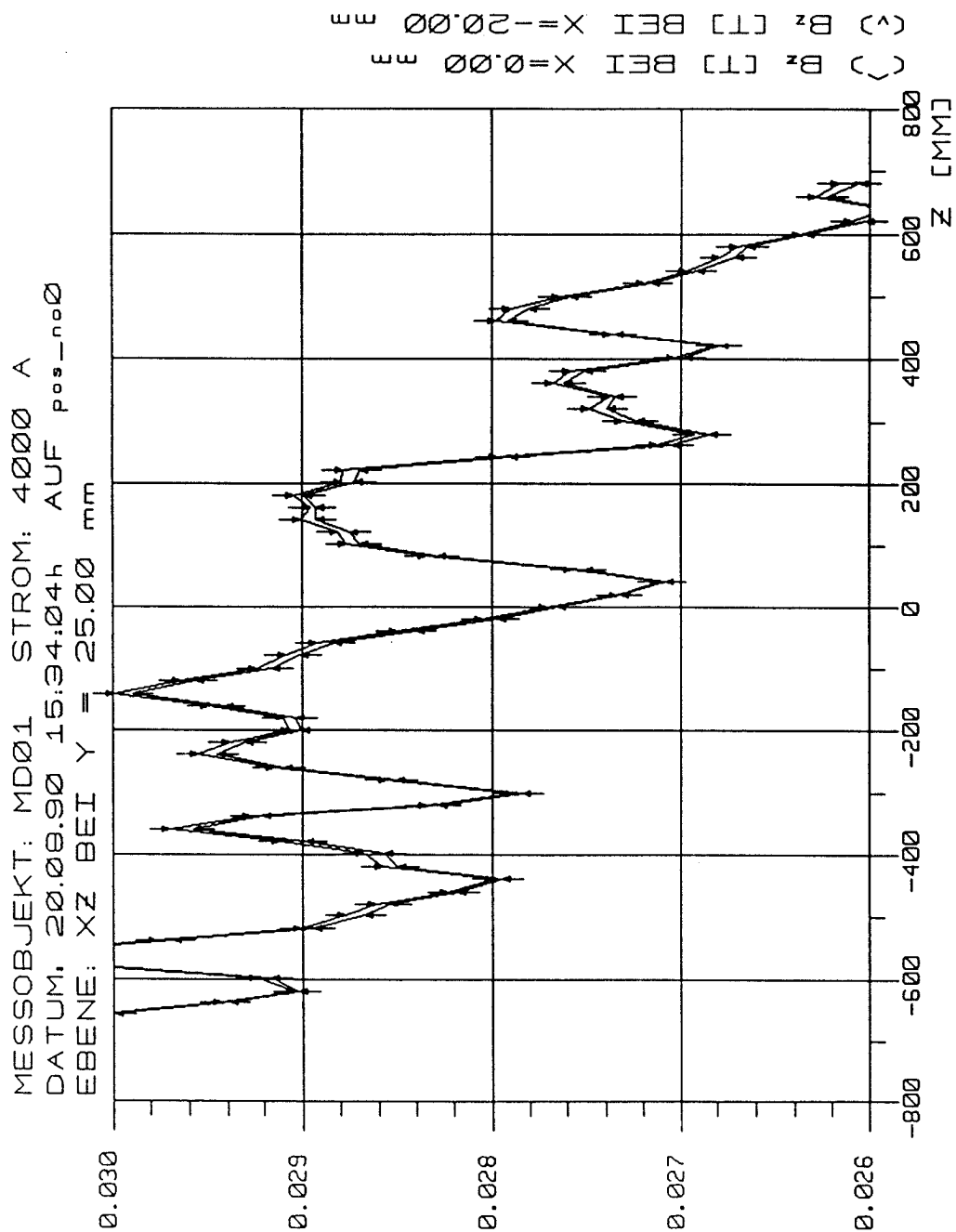


Abbildung 5.9: Feldverteilung der transversalen Feldkomponente B_z in Strahlrichtung Z (Ausschnitt)

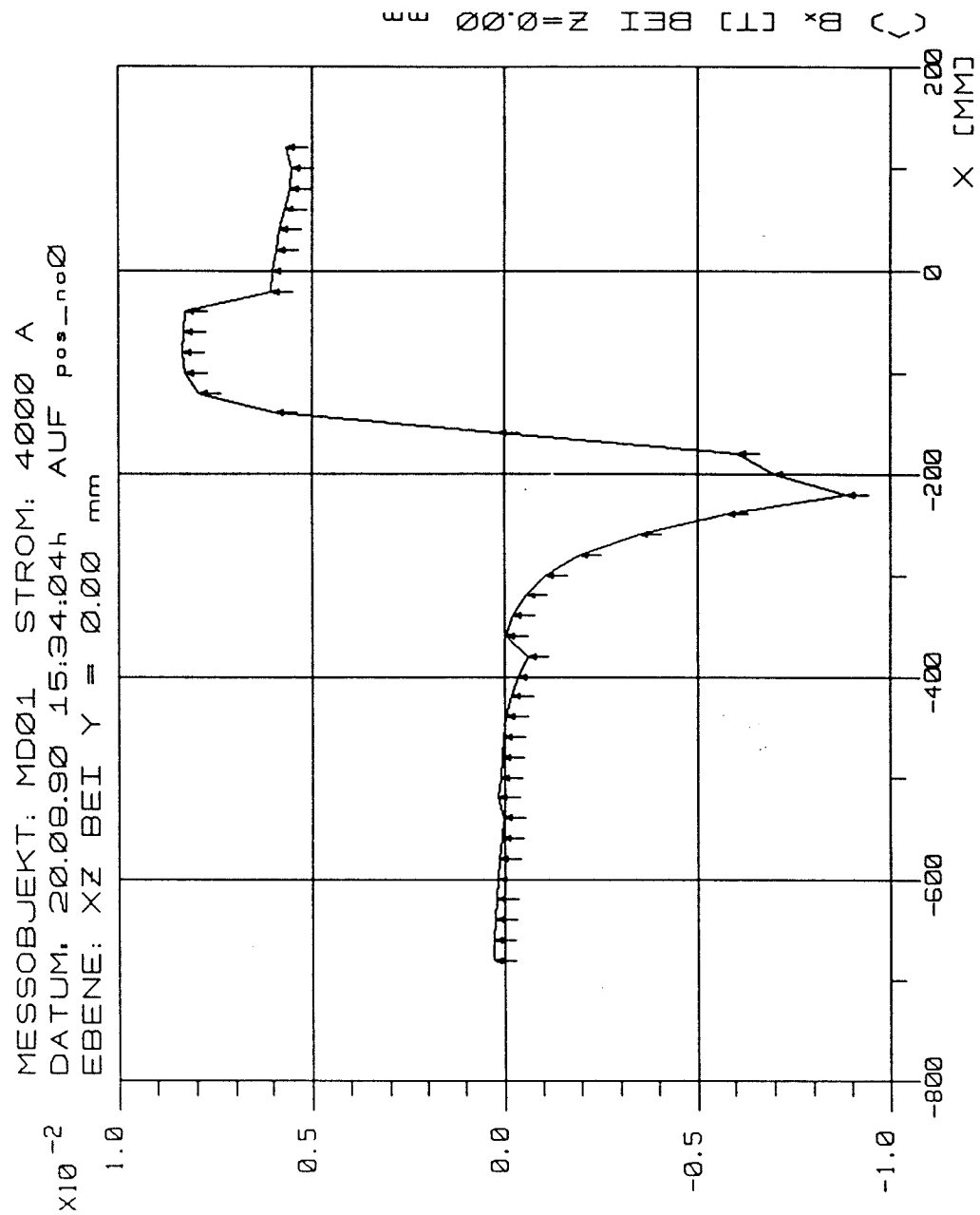


Abbildung 5.10: Feldverteilung der transversalen Feldkomponente B_x in X-Richtung

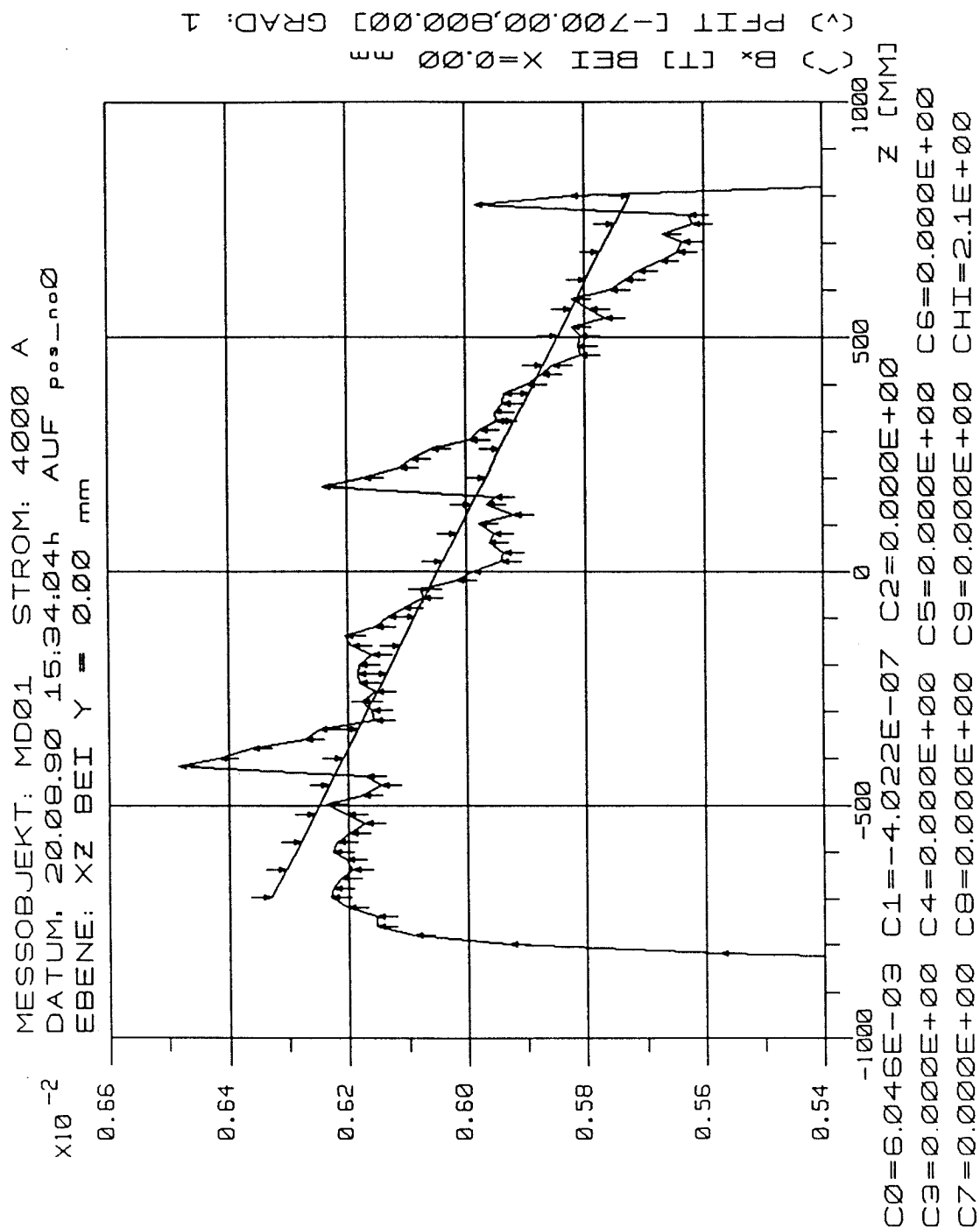


Abbildung 5.11: Feldverteilung der transversalen Feldkomponente B_x in Strahlrichtung Z (Ausschnitt)

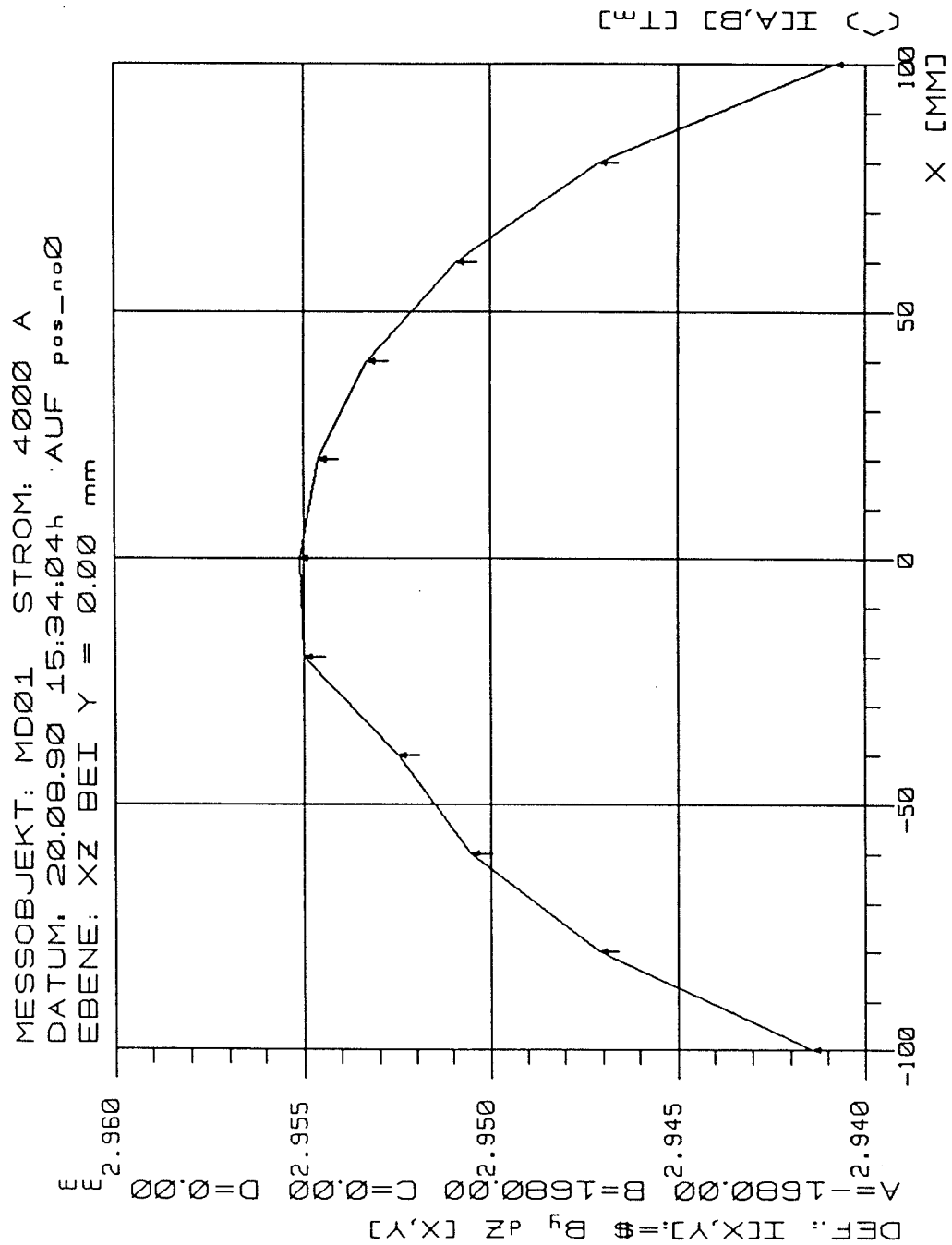


Abbildung 5.12: Ablenkstärke $\int B_y dz$ für mehrere Achsenabschnitte X in einer Umgebung des MKS-Ursprungs

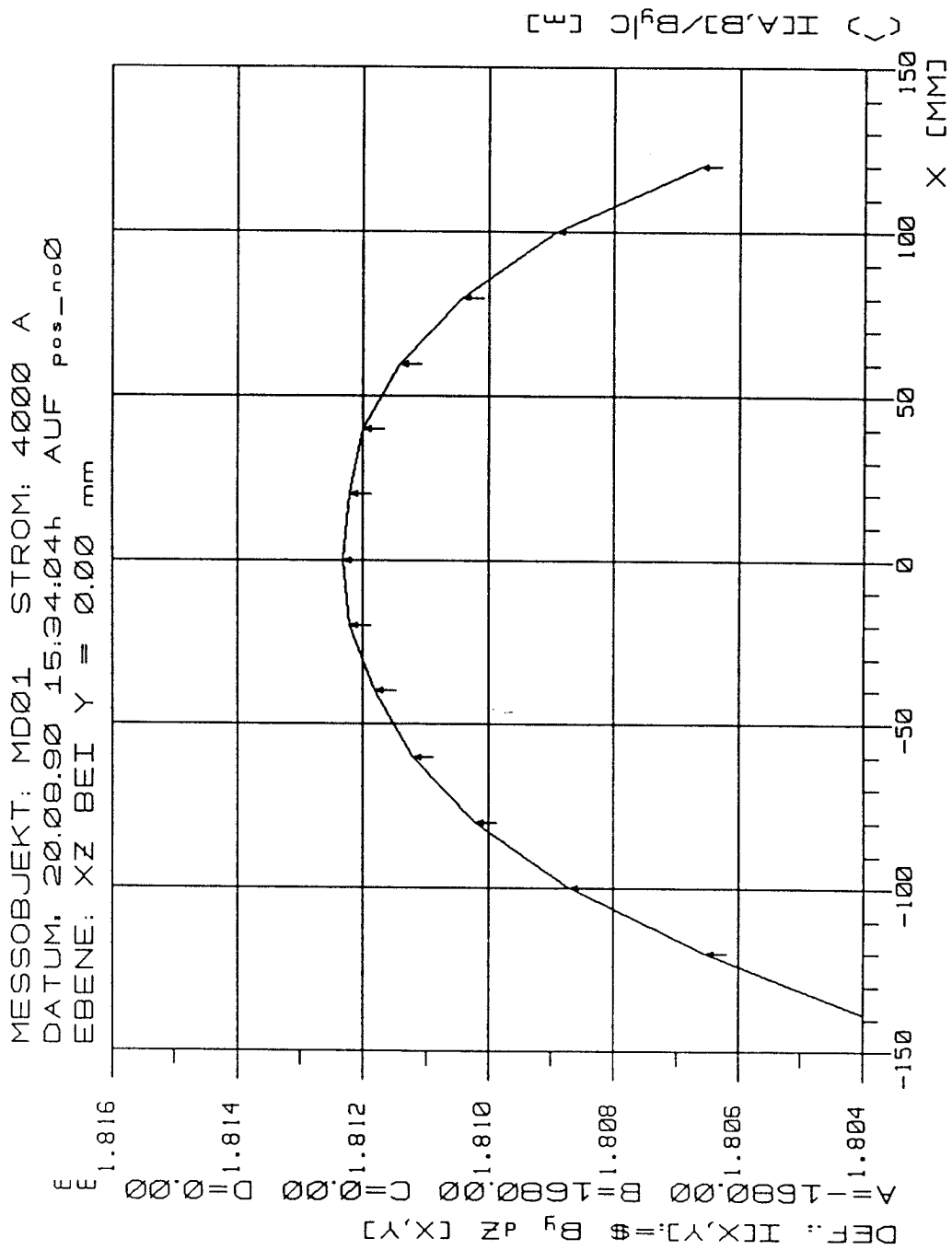


Abbildung 5.13: Effektive Länge für mehrere Achsenabschnitte X in einer Umgebung des MKS-Ursprungs

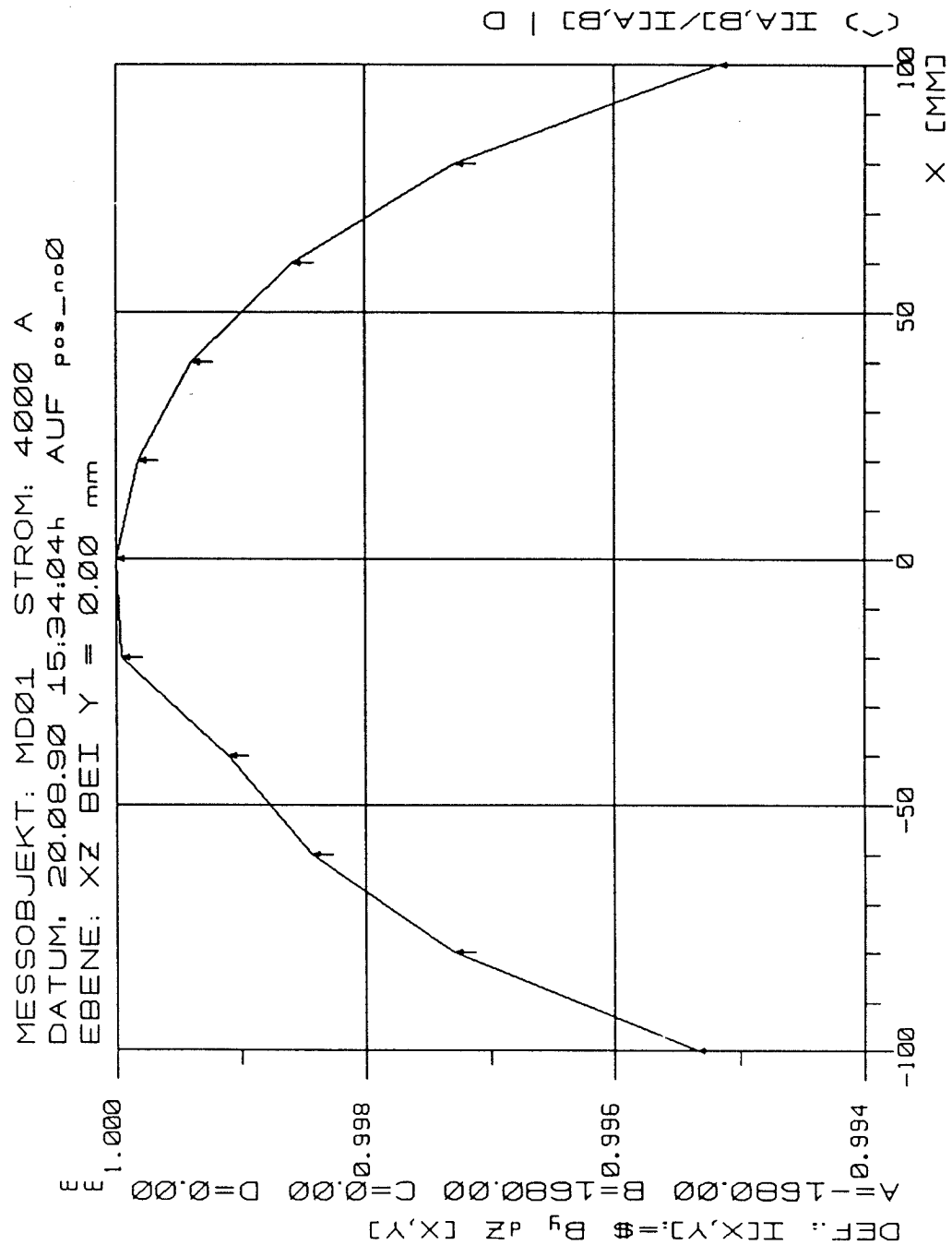


Abbildung 5.14: Normierung der Ablenkstärke $\oint B_y dz$ auf den bei $x = 0$ ermittelten Wert

5.3 Schlußbemerkung

Die hier vorgestellten Meßergebnisse charakterisieren den Dipol MD01 bei einer großen magnetischen Induktion B von 1,63 T im Hauptfeld. Bei dem gewählten Erregungsstrom von 4000 A machen sich Sättigungseffekte des Magneten bemerkbar, die sich nachteilig auf die relative Feldverteilung des Magneten auswirken. Dennoch liegen die Meßergebnisse nicht wesentlich über den geforderten Toleranzen im nutzbaren Feldbereich (vgl. Abschnitt 6.1). Hingegen gibt die dargestellte Feldmessung einen Anhaltspunkt über den Verlauf und die maximale Reichweite des Streufeldes.

Der größte apparative Fehler der Feldmeßmaschine ist mit der Ausrichtung der Meßsonde bei einer Justierung der Feldmeßmaschine und dem Versatz der Meßsondenhalterung verbunden. Während die daraus resultierenden Winkelfehler die Bestimmung der Hauptfeldkomponente nur unwesentlich beeinflussen, machen sie sich bei der Messung der transversalen Feldkomponenten äußerst nachteilig bemerkbar. Die Meßresultate sind in dieser Form nicht für Raytrace-Rechnungen brauchbar.

Daraus resultiert die Notwendigkeit einer neuen Konstruktion der Meßsondenhalterung. Diese könnte aus einem CFK-Stab mit rechteckförmigem Querschnitts bestehen. Zum einen wird durch Verwendung dieses Materials der Durchhang des Stabs beim Herausragen über die Unterstützung minimiert. Andererseits sollte der Stab durch seine definierte Auflagefläche auf der Unterstützung relativ unempfindlich gegenüber Verdrehungen um seine Längsachse sein. Komplikationen beim Umstecken der Halterung werden vermieden, indem genau ein Paßstift auf der Unterstützung angebracht wird, während sich auf der Unterseite des Stabs die entsprechenden Bohrungen im Abstand von 160 mm befinden. Eine Ausrichtung des Hallsondenträgers im an der Anschlußseite befindlichen Gelenk hat sich als problematisch erwiesen. Es wäre von Vorteil, den Hallsondenträger direkt an dem Stabende fest einzuspannen und durch eine Feinmechanik in der unterstützenden Leiste eine Drehung des Stabes um seine Längs- und Querachse zu ermöglichen. Eine Ausrichtung der Hallsondenhalterung ist dann in kleinen Winkelschritten möglich und kann abgebrochen werden, falls in der Mittelebene des Magneten das Meßsignal derjenigen Hallsonden, welche die transversalen Feldkomponenten ermitteln, ein Minimum erreicht.

Kapitel 6

Anhang

6.1 Daten der COSY-Dipole

Daten der COSY-Dipole		
Magnettyp	C-Dipol	
Stückzahl	24	
Polspalthöhe	90	mm
Polspaltbreite	430	mm
Ablenkradius	7	m
Ablenkwinkel	15°	
Kantenwinkel	7,5°	
effektive Länge	1833	mm
Eisenlänge	1761	mm
Eisenhöhe	1690	mm
Eisenbreite	1185	mm
Eisengewicht	~ 25	t
Spulenbreite	150	mm
Sagitta	60	mm
magnetische Induktion	$0,13 \leq B \leq 1,58$	T
Induktionsanstieg	1	$\frac{T}{s}$
Nutzbarer Feldbereich mit $\frac{\Delta B}{B} = \pm 10^{-4}$		
bei Injektionsenergie in X-Richtung	± 70	mm
bei Injektionsenergie in Y-Richtung	± 30	mm
bei Maximalenergie in X-Richtung	± 30	mm
bei Maximalenergie in Y-Richtung	± 12	mm
Identität bzgl. $\int B dl$ aller Dipole	2×10^{-4}	

Tabelle 6.1 Daten der COSY-Dipole (aus [Deck 89])

6.2 Kenndaten der Meßsonden

Die Definition der Maßbezeichnungen von Hallsondenträger und Hallsonden sowie die Pinbezeichnung des Anschlußsteckers ist in Abbildung 3.5 gegeben.

6.2.1 Daten der Hallsondenträger

Lineare Abmessungen			
Länge	l	51,6	mm
Breite	b	11,15	mm
Höhe	h	13,05	mm
	s	1,3	mm
	r	16,0	mm
Hallsondenabstand		20,0	mm

Tabelle 6.2 Daten der Hallsondenträger

6.2.2 Daten der Hallsonde SBV 601-S1

Daten der Hallsonde SBV 601-S1			
Dicke der quadratischen Grundplatte	D	1,2	mm
Länge der quadratischen Grundplatte	a	9,8	mm
Dicke der Hallsonde	d	0,1	mm
Breite der Hallsonde	x	0,8	mm
Länge der Hallsonde	y	2,0	mm
Betriebswert des Steuerstroms	I_H	200	mA
Betriebstemperatur	T	40,0°	C
Hallseitiger Innenwiderstand	R_H	1,1	Ω
Mittlerer Temperaturkoeffizient	ϑ ca.	0,2	%/K

Tabelle 6.3 Daten der Hallsonde SBV 601-S1

6.2.3 Pinbelegung des Anschlußsteckers

Pinbelegung des Anschlußsteckers					
Pin	Belegung	Pin	Belegung	Pin	Belegung
1	$+I_H$	7	—	13	PT100
2	$+U_{\text{hall } 1}$	8	$-I_H$	14	PT100
3	$-U_{\text{hall } 3}$	9	Heizung	15	—
4	$+U_{\text{hall } 3}$	10	—	16	—
5	$-U_{\text{hall } 2}$	11	Heizung	17	—
6	$-U_{\text{hall } 1}$	12	$+U_{\text{hall } 2}$	18	—

Tabelle 6.4 Pinbelegung des Anschlußsteckers

6.3 Daten der Tischsteuerung

Für die manuelle Eingabe der Tischsteuerungsdaten konsultiere der Leser das Betriebshandbuch [S+M 88].

6.3.1 Parameterblöcke der Tischsteuerung

Parameterblock 1:			
1	Referenzlauflfolge	X;Y;Z	
2	Autostart	N	
3	Stop bei E1	N	
4	Pos. Halt bei E3	N	
5	Vorschub in mm	J	
8	Antriebsart	Schrittmotor	
9	Offsetkorrektur	X	0.
		Y	0.
		Z	0.

Parameterblock X, Y, Z:			
A	Datenformat	2.	
B	Getriebe Faktor Zähler	1.	
C	Getriebe Faktor Nenner	2.	
D	Schleppfaktor	2000	
E	Rampe	200	
F	KV-Faktor	1.0	
G	Regelfaktor A	0.02	
H	+Verfahrbereich	+10000	mm
I	-Verfahrbereich	-10000	mm
J	Eilgang	15000	Hz
K	Referenzlaufgeschw.	-5000	Hz
L	Spielausgleich	0.	
M	Fertigmeldung vor Endpos.	5.	
N	Freifahren des Referenzschalters	200.	

Tabelle 6.5 Parameterblöcke der Tischsteuerung

6.3.2 Konfiguration der RS232-Schnittstelle

Konfiguration der RS232-Schnittstelle	
Baudrate	9600
Parität	gerade
Anzahl der Datenbits	7
Anzahl der Stopbits	2

Tabelle 6.6 Konfiguration der RS232-Schnittstelle

Wichtige Bemerkung:

Zur Signalisierung der Datenempfangsbereitschaft müssen die Ausgänge 5 und 20 der V24-Schnittstelle der Tischsteuerung gebrückt sein.

Kapitel 7

Literaturverzeichnis

- [Bev 68] P.R. Bevington: Data Reduction and Error Analysis, 1968
- [Brown 65] K.L. Brown: A First- and Second-Order Matrix Theory for the Design of Beam Transport Systems and Charged Particle Spectrometers, SLAC Report-75, Stanford 1965
- [COSY 86] Kühler-Synchrotron COSY: Technische Beschreibung (Stand 1986), Jül-Spez-370, Jülich 1986
- [Deck 89] G. Decker: Aufbau und Inbetriebnahme einer Dipolfeldmeßmaschine, Jül-Spez-518, Jülich 1989
- [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
- [Hardt 85] A. Hardt, R. Schetzke: Vermessung der dynamischen Eigenschaften eines dreiachsigen Koordinatenmesstischs, Jül-Spez-318, Jülich 1985
- [Jack 83] J.D. Jackson: Klassische Elektrodynamik, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York 1983
- [Krol 90] G. Krol: Meßprotokoll zur Bestimmung der Positioniereigenschaften eines 3-Achsen-Meßtischs und einer Fahrmimik, Jülich 1990
- [Sage 88] T. Sagefka: Kalibrationsdaten zur Eichung der Hallgeneratoren Siemens/SBV 601-S1, Jülich, CERN 1988
- [Schiff 85] W. Schiffer, A. Hardt: Vermessung der statischen Eigenschaften eines dreidimensionalen Koordinatenmesstischs, Jül-Spez-319, Jülich 1985
- [Schlum 88] Solatron Instruments/Schlumberger Meßgeräte GmbH: Bedienungsanleitung der Systemvoltmeter 7061, München 1988
- [Siem] SIEMENS: Datenblatt des Hallgenerators SBV 601-S1
- [S+M 88] S+M Elektronik: Bedienungshandbuch der CNC-Steuerung SM2000, 1988

Diese Arbeit wurde im Institut für Kernphysik des Forschungszentrums Jülich angefertigt.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. H. Paetz gen. Schieck für die Übernahme des Referates und sein Interesse am Fortgang dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr. W. Neuwirth danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Mein besonderer Dank gebührt den Herren Dr. A. Hardt und Dr. U. Bechstedt für die Themenstellung und fortwährende Unterstützung dieser Arbeit.

Ferner möchte ich auch meinen Dank den Mitarbeitern des Instituts IKP/COSY aussprechen, die mit ihrer Bereitschaft zur Diskussion und tatkräftigen Unterstützung mit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Für den fruchtbaren Gedankenaustausch bedanke ich mich bei den Herren Dr. S. Martin, Dr. T. Pawlat, G. Schug und G. Decker. Ein Dankeschön auch an die Herren T. Sagefka, G. Dolfus und G. Krol für die Hilfe beim Aufbau der Meßmaschine und an Herrn K. Henn für die Wartung der Rechner.

