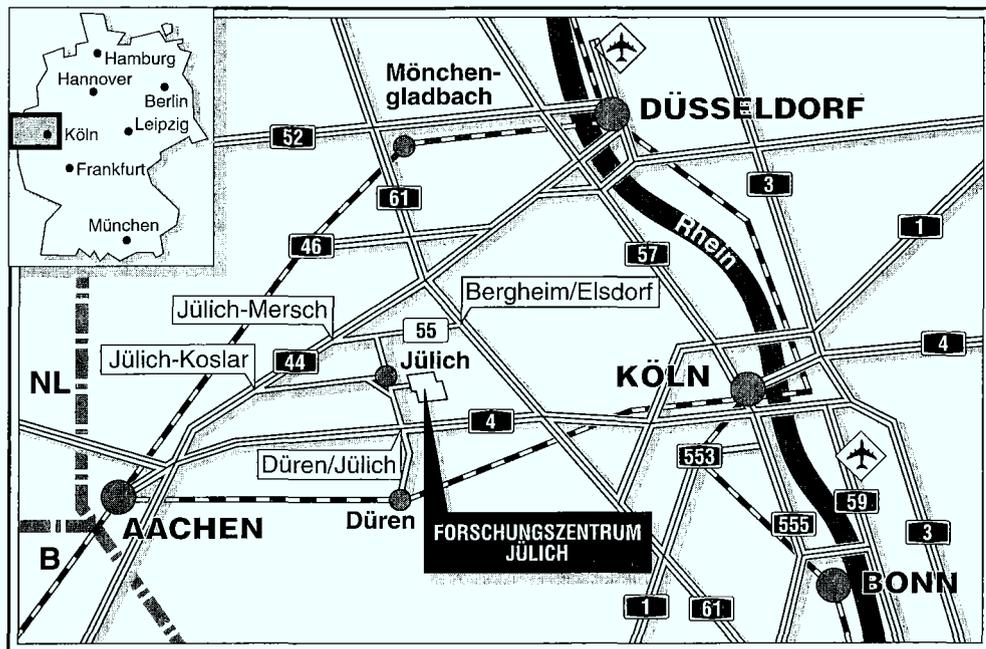


*Institut für Kernphysik*

**Entwicklung eines schnellen Magnetfeld-  
meßsystems zur Ermittlung von Vakuum-  
gefäßeigenschaften**

Hubert Lainck



**Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 3146**

ISSN 0944-2952

Institut für Kernphysik Jül-3146

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek

D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

Telefon: 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · Telex: 833556-70 kfa d

# **Entwicklung eines schnellen Magnetfeld- meßsystems zur Ermittlung von Vakuum- gefäßigenschaften**

Hubert Lainck

## **Vorwort**

Die vorliegende Diplomarbeit entstand am Institut für Kernphysik (IKP - COSY) des Forschungszentrums Jülich GmbH.

Im Hinblick auf die Entstehung dieser Arbeit möchte ich mich bei

**Herrn Prof. Dr. -Ing. U. Schwarz**

für die interessante Themenstellung, die zahlreichen fachlichen  
Diskussionen sowie für die Übernahme des Referates  
und bei

**Herrn Prof. Ing. K. G. Giese**

für die Übernahme des Koreferates recht herzlich bedanken.

Besonderer Dank gilt auch

**Herrn Dr. U. Bechstedt**

für die freundliche Aufnahme von seiten der KFA und die  
ständige Gesprächsbereitschaft sowie

**Herrn G. Dolfus, Herrn D. Rosin und Herrn T. Sagefka**

für die hervorragende technische Unterstützung und die damit  
verbundene stete Gesprächsbereitschaft.

Weiterhin möchte ich mich recht herzlich bei

**Herrn Dipl.-Ing. H. Schneider**

für die moralische Betreuung und die anregende Diskussionsbereitschaft sowie

**Herrn Dipl.-Ing. N. Bongers**

für die Einweisung in die Netzgeräteeinstellung sowie deren Wartung bedanken.

Darüber hinaus möchte ich mich noch bei

**Herrn A. Bange**

für den regen Gedankenaustausch während der Diplomarbeit bedanken.

Außerdem gilt mein Dank auch allen anderen, nicht explizit aufgeführten Mitarbei-  
tern des Institutes IKP der KFA für die freundliche Unterstützung.

Jülich, im November 1995

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 COSY . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	4
<b>2 Theoretische Grundlagen.</b> . . . . .	<b>6</b>
2.1 Das magnetische Feld . . . . .	6
2.1.1 Die magnetische Induktion $\vec{B}$ . . . . .	6
2.1.2 Der Gradient . . . . .	10
2.1.3 Der magnetische Fluß $\Phi$ . . . . .	11
2.1.4 Die Permeabilität $\mu$ . . . . .	11
2.1.5 Die magnetische Erregung $\vec{H}$ . . . . .	12
2.1.6 Das Induktionsgesetz . . . . .	13
2.1.7 Die Hysterese . . . . .	14
2.1.8 Die Wirbelströme . . . . .	16
<b>3 Meßaufbau</b> . . . . .	<b>19</b>
3.1 Hardware . . . . .	21
3.1.1 Das Meßobjekt . . . . .	21
3.1.2 Die Meßsensoren . . . . .	22
3.1.2.1 Der Null-Fluß-Stromwandler (DCCT) . . . . .	22
3.1.2.2 Die Meßspule . . . . .	24
3.1.3 Die Meßgeräte . . . . .	26
3.1.3.1 Der PDI 5025 . . . . .	26
3.1.3.2 Das DVM HP 3458A . . . . .	28
3.1.4 Die Ansteuerung . . . . .	29
3.1.4.1 Das AEG-Netzgerät . . . . .	29
3.1.4.2 Der Puls-/Funktionsgenerator HP 8161A . . . . .	30

## Inhaltsverzeichnis

---

3.1.4.3 Die Tischsteuerung . . . . .	31
3.1.4.4 Der Personal-Computer (PC) . . . . .	32
3.2 Software . . . . .	34
3.2.1 LabVIEW . . . . .	34
<b>4 Meßablauf . . . . .</b>	<b>37</b>
4.1 Voreinstellungen . . . . .	37
4.2 Das Hauptprogramm . . . . .	37
4.2.1 Programm verlassen . . . . .	38
4.2.2 Justieren der Spulen . . . . .	38
4.2.3 Magnetfeldmessung . . . . .	39
4.3 Auswerten der Meßwerte . . . . .	48
<b>5 Meßgenauigkeit und Fehler . . . . .</b>	<b>49</b>
5.1 Flußmessung mit dem PDI . . . . .	49
5.2 Rampenstrommessung mit dem DCCT . . . . .	53
5.3 Impulserzeugung mit dem HP 8161A Puls-/Funktionsgenerator . . . . .	54
<b>6 Meßergebnisse . . . . .</b>	<b>55</b>
6.1 Vorbemerkung zu den Meßreihen . . . . .	55
6.2 Flußmessungen innerhalb eines Strahlrohres . . . . .	59
6.3 Flußmessungen innerhalb eines Kupferrohres . . . . .	67
6.4 Ermittlung der Zeitkonstante $\tau$ bei unterschiedlichen Einstellungen . . . . .	70
<b>7 Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>8 Anhang . . . . .</b>	<b>77</b>

## Inhaltsverzeichnis

---

8.1	Befehlsliste des HP 3458A DVM . . . . .	77
8.2	Befehlsliste des HP 8161A Puls-/Funktionsgenerators . . . . .	78
8.3	Befehlsliste des PDI 5025 . . . . .	78
8.4	Meßspulendaten . . . . .	79
8.5	Magnetdaten . . . . .	82
8.6	Parametereingaben der Positioniereinrichtung . . . . .	82
8.7	Schnittstellenkonfiguration der IEEE 488.2 . . . . .	83
8.8	Kennwerte zum COSY - Vakuumgefäß . . . . .	84
8.9	Das Meßprotokoll . . . . .	85
8.10	Flußdiagramm des Meßprogramms . . . . .	86
 <b>9 Literaturverzeichnis . . . . .</b>		<b>91</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

In diesem Kapitel wird zunächst der Teilchenbeschleuniger COSY, bei dem später die Meßergebnisse dieser Diplomarbeit Verwendung finden, beschrieben. Weiterhin wird die allgemeine Aufgabenstellung zur Diplomarbeit erläutert.

### 1.1 COSY

Bei dem Cooler Synchrotron (**COSY**) des Institutes für Kernphysik Jülich der KFA Jülich handelt es sich um einen Beschleuniger und Speicherring für Protonen, die auf Energien im Bereich von 40 MeV bis zu 2,5 GeV beschleunigt werden können. (**Abb. 1.1** zeigt einen Lageplan der Anlage) Die vorrangige Aufgabe von COSY besteht darin, die Grundlagenforschung im Bereich der Teilchenphysik voranzutreiben. Im Mittelpunkt steht die starke Wechselwirkung, die bei höheren Energien zu angeregten Nukleonen im Nukleonenverband führt. [Stob93] [Cosy86]

Der 183,5 m lange COSY-Ring besteht aus zwei Bögen, in denen der Strahl durch insgesamt 24 Dipolmagnete um je  $180^\circ$  abgelenkt wird, und aus zwei 40 m langen geraden Sektionen, auf denen die internen Targets sowie die Kühleinrichtungen untergebracht sind. Die Protonen des Strahls werden im Zyklotron JULIC als  $\text{H}_2^+$ -Moleküle auf 80 MeV vorbeschleunigt. Bei der Injektion in COSY wird durch eine dünne Kohlenstoffolie das Elektron abgestreift, so daß 2 Protonen mit jeweils 40 MeV in COSY umlaufen, die dann weiter beschleunigt werden können. Die Protonen befinden sich dabei in einer Vakuumröhre, die auf  $300^\circ\text{C}$  ausheizbar ist, um mit Hilfe verschiedener Vakuumpumpen ein Ultrahochvakuum  $< 10^{-10}$  mbar zu erzeugen. Aufgrund der Ladungsabstoßungen innerhalb des Protonenstrahles müssen die Teilchen des Protonenstrahles in transversaler Richtung fokussiert werden. Dabei werden zum Erreichen einer präzisen Strahlführung im Beschleunigerring insgesamt 56 Quadrupolmagnete eingesetzt. Quadrupolmagnete sind jeweils in einer Ebene (horizontal bzw. vertikal) fokussierend und der anderen Ebene defokussierend. Durch alternierende Anordnung fokussierender und defokussierender Quadrupole erreicht man, daß der Protonenstrahl in beiden Ebenen fokussiert wird.

Der Protonenstrahl kann bis auf etwa 96% der Vakuumlichtgeschwindigkeit ( $c_0 = 299792458 \text{ m/s}$ ) beschleunigt werden. Während der Beschleunigungsphase wird die Energie des Protonenstrahls bis auf seine Endenergie von 2,5 GeV gesteigert. Nach der Beschleunigung können die Protonen sowohl an den internen Targets als auch nach der Extraktion aus dem Ring an den externen Targetplätzen für Experimente genutzt werden.

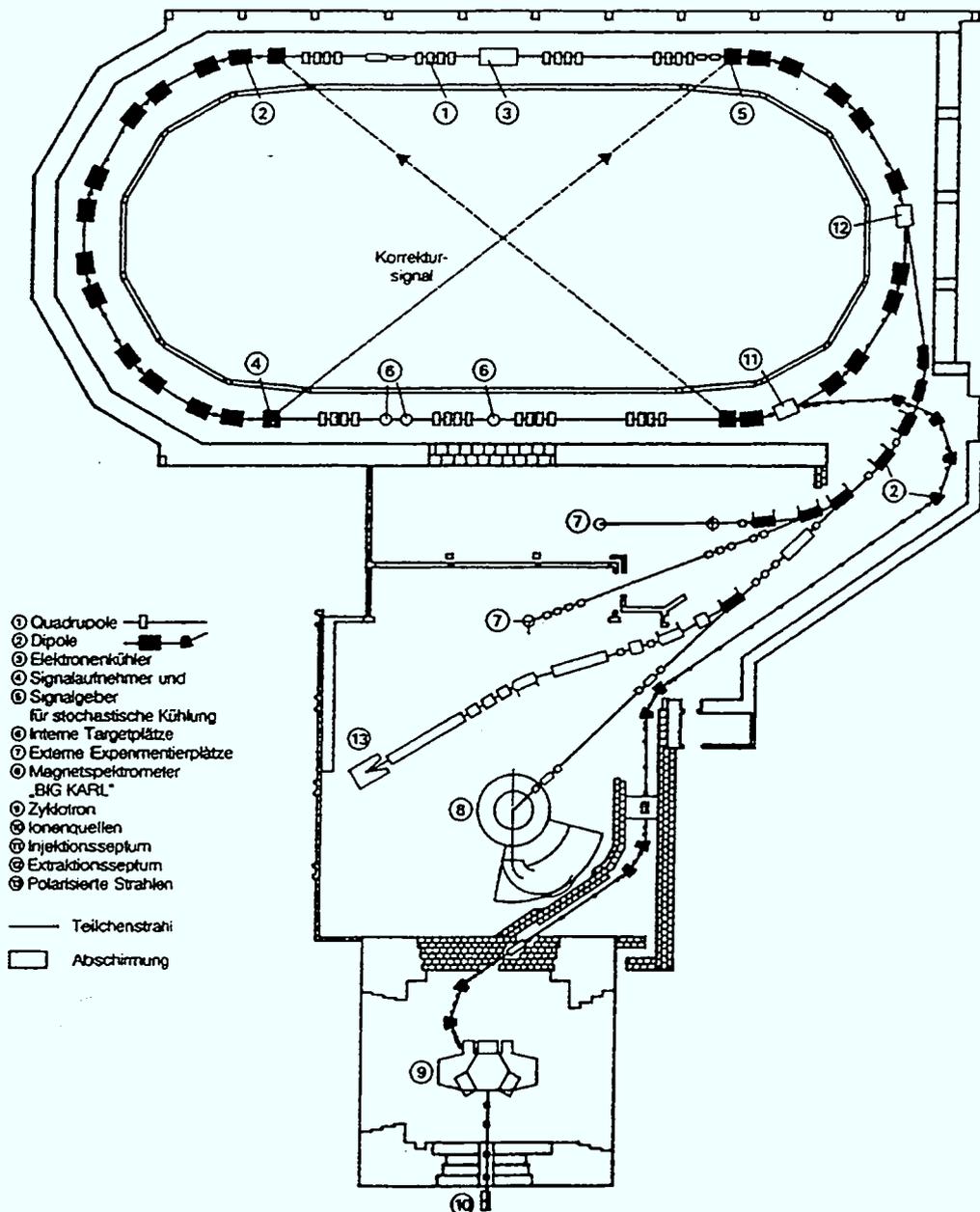


Abb. 1.1 Lageplan des COSY-Ringes

Bei COSY werden zwei unterschiedliche Verfahren zur Strahlkühlung eingesetzt, welches ihn somit von anderen Teilchenbeschleunigerringen wie z.B. Celsius / Schweden, IUCF / USA oder auch TARN / Japan unterscheidet.

Zum einen wird im unteren Energiebereich das Verfahren der Elektronenkühlung angewandt, wobei ein monoenergetischer, wohlgeordneter Elektronenstrahl mit Hilfe eines Magnetfeldes in den COSY-Strahl eingeschleust wird. Dieser begleitet ihn daraufhin für eine Strecke von 2 m, um anschließend unter Zuhilfenahme eines Magnetfeldes wieder extrahiert zu werden. Auf der gemeinsam zurückgelegten Flugstrecke wird dem umlaufenden Protonenstrahl durch Coulomb-Stöße eine sowohl longitudinal als auch transversal geordnete Bewegung aufgezwungen, so daß man einen geordneten „gekühlten“ Protonenstrahl erhält. Diese Vorgehensweise wiederholt sich ca. 500000 mal pro Sekunde, um einen geordneten Strahl zu erhalten (Abb. 1.2).

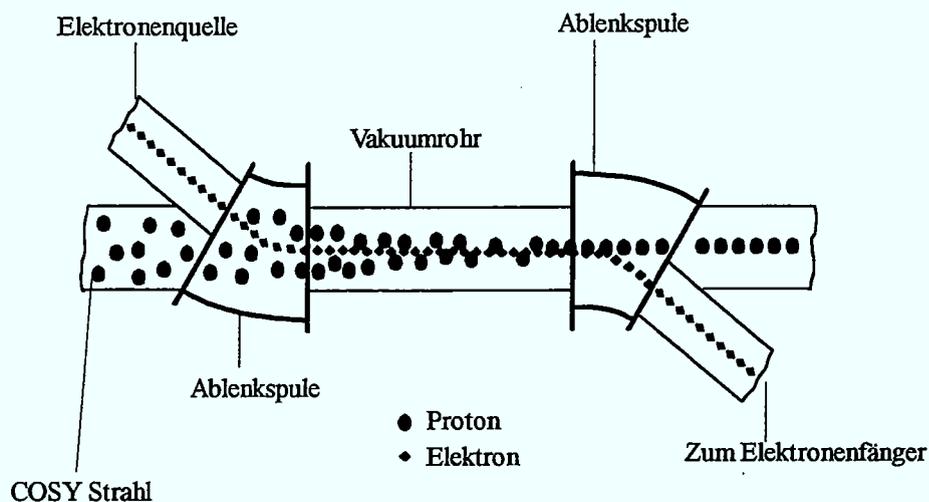


Abb. 1.2 Prinzip der Elektronenkühlung

Darüber hinaus wird bei höheren Energien die stochastische Kühlung eingesetzt. Hierbei werden die Abweichungen des Strahles von der Sollbahn gemessen. Mit diesen ermittelten Daten wird ein Korrektursignal erzeugt, das einen diametral gegenüberliegenden Kicker steuert und somit die Abweichungen von der Sollbahn in transversaler Richtung korrigiert (Abb. 1.3).

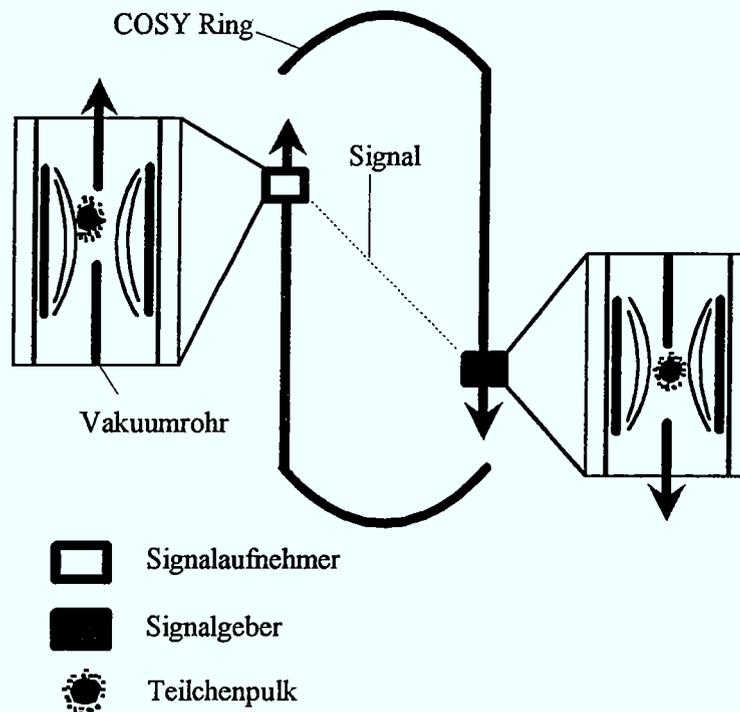


Abb. 1.3 Prinzipbild der stochastischen Kühlung

## 1.2 Aufgabenstellung

Da dem Magnetfeld eine zentrale Rolle im Teilchenbeschleunigerring zukommt, ist es wichtig, das Aufbauverhalten eines Magnetfeldes innerhalb des Vakuumgefäßes nach Aufschaltung einer Stromrampe zu kennen.

Dabei treten unter anderem folgende Phänomene auf:

- Wirbelströme im Eisenjoch des Magneten
- Wirbelstromeffekte innerhalb des Vakuumgefäßes
- unterschiedliche Einflüsse der Vakuumgefäßtypen auf das Magnetfeld

Die daraus resultierende Aufgabe besteht darin, zunächst einen Meßplatz für die dynamische Magnetfeldvermessung aufzubauen. Mit dessen Hilfe sollen der Erregerstrom sowie die daraus resultierende magnetische Flußänderung in einem Meßraster von wenigen Millisekunden aufgenommen werden. Dieses erfordert einen

rechnergesteuerten Meßablauf, da die dynamische Magnetfeldvermessung für verschiedene Vakuumgefäße durchgeführt werden soll, um diese später miteinander zu vergleichen. Hierbei stellt LabVIEW, ein Meßwerterfassungs- und Meßwertverarbeitungsprogramm, die Schnittstelle zwischen dem Personal-Computer und der Hardware des Meßaufbaues dar. Als letzter Schritt erfolgt die Interpretation der aufgenommenen Meßwerte, mit dem Ziel die „störenden“ Einflüsse des Vakuumgefäßes zu eliminieren oder zumindest zu verringern. Mit den so ermittelten Daten sollen anschließend die Stromrampen, die im COSY-Ring die Magnete ansteuern, optimiert werden, um eine noch verlustfreiere Beschleunigung des Protonenstrahles zu erreichen.

## Kapitel 2

### Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zum magnetischen Feld erklärt, die für das Verständnis dieser Arbeit wichtig sind. [Dobr88] [Lind91] [Froh94] [Phil86]

#### 2.1 Das magnetische Feld

1. Auf magnetische (ferromagnetische) Stoffe wie z.B. Eisen, Nickel, Kobalt oder auch verschiedene Legierungen wird vom Magneten eine Kraft ausgeübt.
2. Die Krafterwirkung ist besonders stark ausgeprägt an den Enden des Magneten, den sogenannten Polen.
3. Nähert man zwei Magnete mit gleichnamigen Polen einander an, so ist eine Krafterwirkung entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung spürbar.
4. Die Kräfte eines Magneten sind, wie auch die elektrischen Ladungen, über Entfernungen hinweg wirksam. Dieser Bereich der Kraftwirkung wird als magnetisches Kraftfeld oder auch kurz als **Magnetfeld** bezeichnet.

##### 2.1.1 Die magnetische Induktion $\vec{B}$

Bei der magnetischen Induktion - im internationalem Schrifttum häufig magnetische Feldstärke genannt - handelt es sich um eine vektorielle Größe, die aus der Intensität und der Feldrichtung besteht. Dies bedeutet, daß jeder Raumpunkt des magnetischen Feldes mit eben diesen beiden Angaben beschrieben werden kann. Der Raum, in dem diese Kräfte wirken, heißt magnetisches Feld und kann mit Hilfe eines Eisenspanbildes (**Abb. 2.1**) sichtbar gemacht werden, das die magnetischen Feldlinien in ihrer Richtung der Kraftwirkungen zeigt. Dabei erkennt man die Ortsabhängigkeit der Intensität an der Tatsache, daß die Eisenspäne mit größer werdendem Abstand vom Magneten immer weniger ausgelenkt werden, da die Intensi-

tät mit steigendem Abstand nachläßt und somit die Eisenspäne nicht mehr gegen die Haftreibung der Auflagefläche gedreht bzw. ausgerichtet werden können.

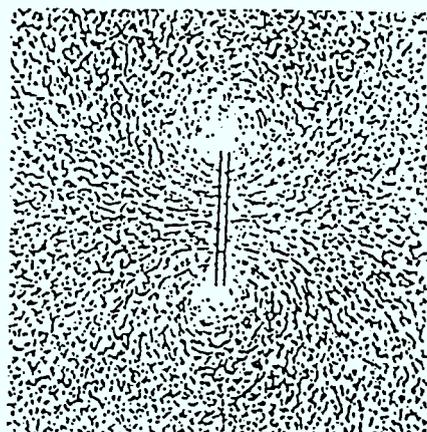


Abb. 2.1 Eisenspanbild

Die Einheit für die magnetische Induktion läßt sich anhand des folgenden Versuches herleiten. (siehe Abb. 2.2)

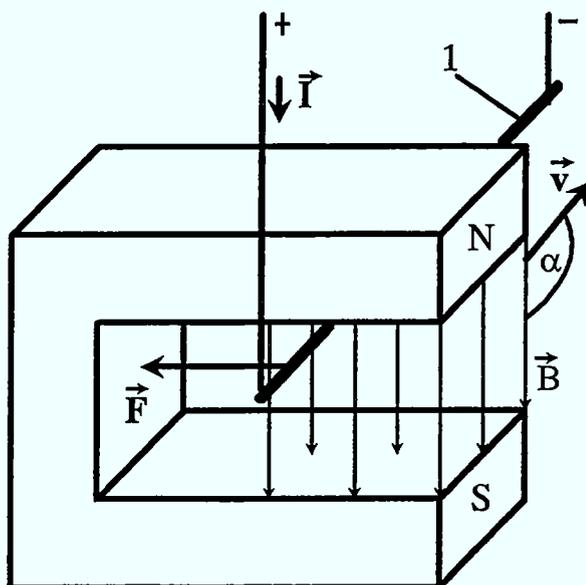


Abb. 2.2.a. ein beweglicher, stromführender Leiterstab liegt in einem Magnetfeld

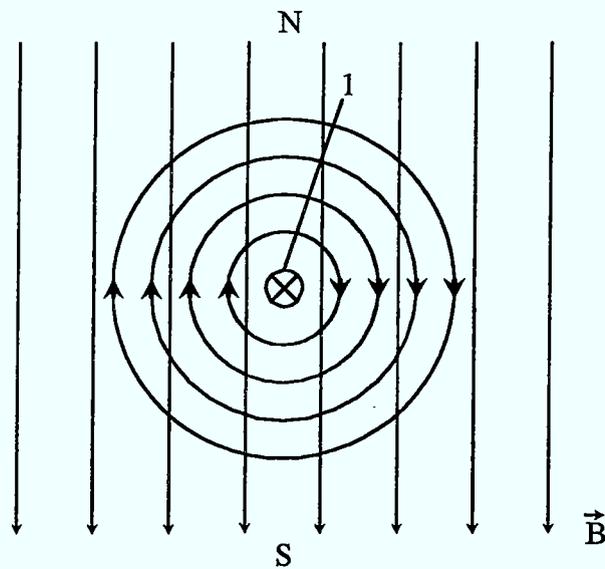


Abb. 2.2.b beide Magnetfelder getrennt gezeichnet

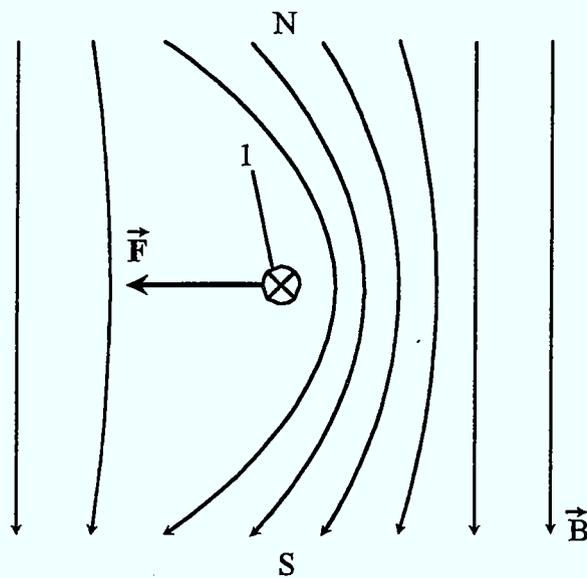


Abb. 2.2.c Überlagerung der Magnetfelder und die Kraftwirkung auf den Leiter

Hierbei entspricht: 1 dem Leiterstab

$\vec{F}$  der Krafteinwirkung auf dem Leiter

$\vec{B}$  der magnetischen Induktion

$\vec{v}$  der Driftgeschwindigkeit der bewegten Ladungsteilchen

- $\alpha$  dem eingeschlossenem Winkel zwischen  $\vec{v}$  und  $\vec{B}$
- $\vec{I}$  dem Strom
- N dem Nordpol des Magneten
- S dem Südpol des Magneten

Sobald der im Magnetfeld befindliche Leiterstab (**Abb. 2.2.a**) von einem Strom durchflossen wird, bewegt sich der Stab nach links, wenn das vordere Ende des Stabes mit dem positiven Pol verbunden ist, bzw. nach rechts, wenn es mit dem negativen Pol verbunden ist. Dabei ergaben genauere Messungen, daß die Kraft (nach dem Physiker H.A. Lorentz (1853/1928) auch Lorentzkraft  $F_L$  genannt), die auf den senkrecht zum Magnetfeld stehenden Leiterstab wirkt, proportional zur Driftgeschwindigkeit  $\vec{v}$  der bewegten Ladungsteilchen im Leiterstab ist.

$$\vec{F}_L \sim \vec{v}$$

Da die Auslenkkraft ebenfalls von der magnetischen Induktion  $\vec{B}$  abhängig ist und aufgrund der geometrischen Anordnung zwischen  $\vec{B}$  und  $\vec{v}$  läßt sich, unter Berücksichtigung der Ladung  $Q$  der bewegten Teilchen schreiben:

$$F_L = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad \text{oder vektoriell geschrieben} \quad \vec{F}_L = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Aus den gegebenen Größen ist die magnetische Induktion und ihre Einheit festlegbar:

$$B = \frac{F_L}{Q \cdot v \cdot \sin \alpha}$$

$$[B] = \frac{N}{C \cdot \frac{m}{s}} = \frac{Vs}{m^2} \qquad 1 N = 1 kg \cdot \frac{m}{s^2}$$

$$1 C = 1 A \cdot s$$

Dabei gilt:

$$1 \frac{Vs}{m^2} = 1 \text{ Tesla} = 1 T$$

Nach Nicola Tesla (1856/1943)

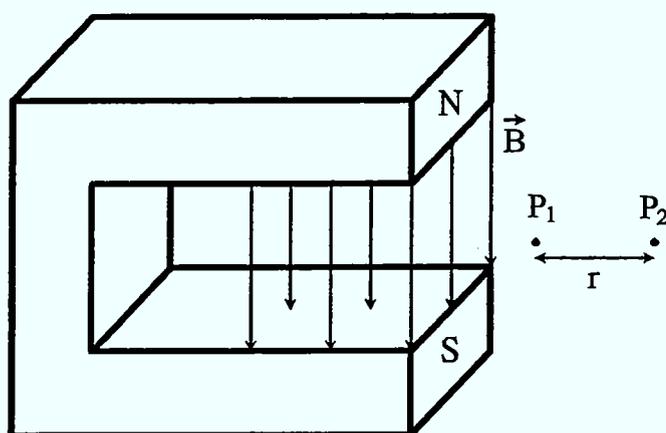
### 2.1.2 Der Gradient

Bei dem magnetischen Gradienten  $G$  handelt es sich um die Ableitung der magnetischen Induktion  $\vec{B}$  nach dem Abstand  $r$ .

$$G = \frac{d\vec{B}}{dr}$$

$$G = \left[ \frac{T}{m} \right]$$

Mit dem Gradienten läßt sich die magnetische Induktionsdifferenz zweier Meßpunkte ermitteln, die außerhalb eines homogenen Magnetfeldes liegen, so wie es in **Abb. 2.3** zu sehen ist.



**Abb. 2.3** Differenzinduktionsbestimmung mit Hilfe des Gradienten und der Meßpunkte  $P_1$  und  $P_2$ , die um den Abstand  $r$  voneinander entfernt liegen.

### 2.1.3 Der magnetische Fluß $\Phi$

Bei dem magnetischen Fluß  $\Phi$  handelt es sich um das Flächenintegral über der magnetischen Induktion  $\vec{B}$  und dem Flächenvektor  $d\vec{A}$ .

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \text{bzw.} \quad \Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Somit läßt sich die Einheit für den magnetischen Fluß wie folgt festlegen:

$$[\Phi] = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} * \text{m}^2 = \text{Vs}$$

Wird die Fläche  $d\vec{A}$  aufgespalten in

$$dA = dl * b * N$$

- hierbei steht  $b$  für die Spulenbreite,  $dl$  für ein Längenelement der Spule und  $N$  für die Windungszahl der Spule -, so läßt sich die obige Gleichung umschreiben in

$$\frac{\Phi}{b * N} = \int \vec{B} \cdot dl$$

wobei  $\int \vec{B} \cdot dl$  als Ablenkstärke bezeichnet wird. Dividiert man sie durch die Induktion  $B_0$  im homogenen Teil des Magneten, so resultiert daraus die effektive Länge  $l_{\text{eff}}$  des Magneten.

$$l_{\text{eff}} = \frac{\int B dl}{B_0}$$

### 2.1.4 Die Permeabilität $\mu$

Bei Versuchen mit langen freigewickelten Spulen ist zu erkennen, daß eine Proportionalität der Induktion mit der Spulenlänge  $l$ , dem Erregerstrom  $\vec{I}$  der Spule und der Windungszahl  $N$  besteht.

$$\vec{B} \sim \frac{\vec{I} * N}{l}$$

Nach Einführung der Permeabilität  $\mu$  kann die Gleichung umgeschrieben werden zu:

$$\vec{B} = \mu * \frac{\vec{I} * N}{l}$$

$$[\mu] = \frac{Vs}{Am}$$

Dabei besteht die Permeabilität  $\mu$  aus 2 Faktoren, der Permeabilitätskonstanten  $\mu_0$  (auch Vakuumpermeabilität genannt) und der Permeabilitätszahl  $\mu_r$ . Die Permeabilitätszahl  $\mu_r$  ist material-, feld-, temperatur- und richtungsabhängig.

$$\mu = \mu_0 * \mu_r$$

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

### 2.1.5 Die magnetische Erregung $\vec{H}$

Bei der magnetischen Erregung  $\vec{H}$  (früher auch magnetische Feldstärke genannt), handelt es sich um eine materialunabhängige Feldgröße, die im Innern einer langgestreckten Spule der Windungszahl  $N$  und der Länge  $l$  auftritt, sobald sie von einem Strom  $\vec{I}$  durchflossen wird.

$$\vec{H} = \frac{N * \vec{I}}{l}$$

Da, wie bei der Permeabilität bereits gesehen, die magnetische Induktion durch die Gleichung

$$\vec{B} = \mu * \frac{\vec{I} * N}{l}$$

ausgedrückt werden kann, läßt sich die magnetische Erregung schreiben als:

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \quad \text{bzw.} \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$

Somit erhält man als Einheit für die magnetische Erregung:

$$[H] = \frac{\frac{Vs}{Am}}{\frac{Vs}{Am}} = \frac{A}{m}$$

### 2.1.6 Das Induktionsgesetz

Der in einer Spule mit der Windungszahl  $N$  induzierte Spannungsstoß  $U_{ind}$  ist gleich dem Produkt aus der Windungszahl  $N$  und der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses  $\Phi$ , der von der Spule umfaßt wird.

$$\int_0^t u dt = N * (\Phi_t - \Phi_0)$$

$$U_q = N * \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{oder} \quad U_{ind} = -N * \frac{d\Phi}{dt}$$

$$[U_{ind}] = V$$

Dabei wird die Induktionsspannung oft mit negativem Vorzeichen angegeben, welches andeuten soll, daß der induzierte Strom die gleiche Richtung wie die induzier-

te Spannung hat, also in entgegengesetzter Richtung von der Quellenspannung  $U_q$  fließt (siehe Abb. 2.4).

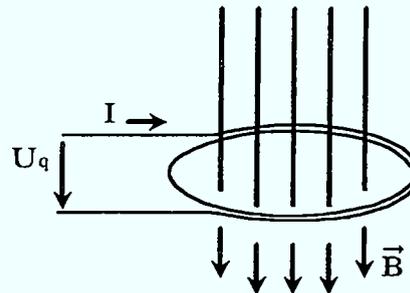


Abb. 2.4 Quellenspannung an einer Leiterschleife

### 2.1.7 Die Hysterese

Die Abhängigkeit der magnetischen Induktion  $B$  von der magnetischen Erregung  $H$  ergibt eine für jede Eisensorte charakteristische Magnetisierungskurve (Abb. 2.5.a). Die für jeden Kurvenpunkt berechnete Permeabilitätszahl  $\mu_r$  ist in Abb. 2.5.b in Abhängigkeit von der magnetischen Erregung dargestellt.

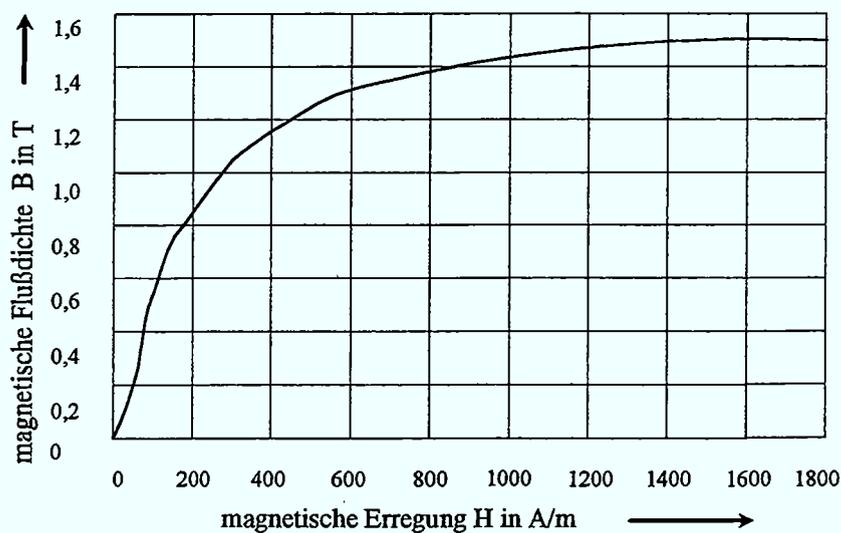
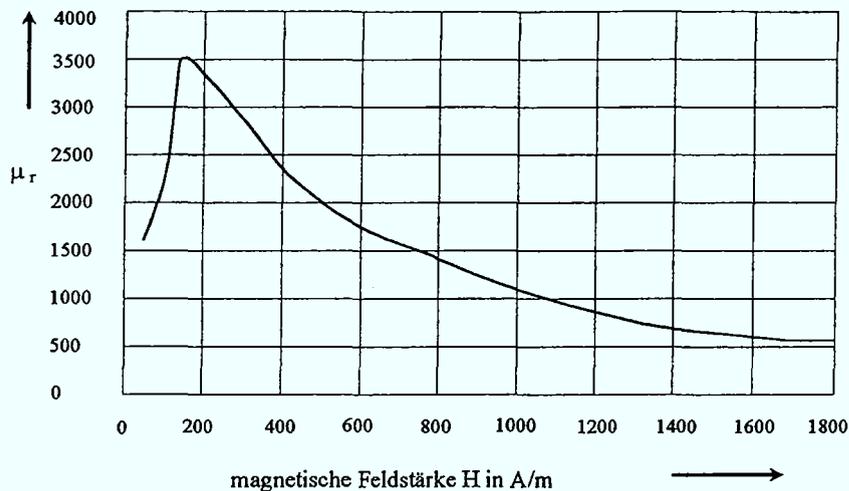


Abb. 2.5.a Magnetisierungskurve von Dynamoblech



**Abb. 2.5.b** Die Permeabilitätszahl von Dynamoblech in Abhängigkeit von der Feldstärke

Dabei ist zu erkennen, daß mit zunehmender Erregung die magnetische Induktion langsamer zunimmt, bis das Eisen magnetisch gesättigt ist. Dort hat das Eisen auf die Zunahme der magnetischen Induktion keinen Einfluß mehr, und es gilt:

$$\Delta B_S = \mu_0 \cdot \Delta H$$

Wird bei einer zunächst unmagnetischen Eisenprobe bei schrittweiser Vergrößerung der magnetischen Erregung  $H$  die magnetische Induktion  $B$  gemessen, so entsteht die in **Abb. 2.6** angegebene Neukurve a,b,c. Nach dem Erreichen der Sättigung  $B_S$  wird die Erregung wieder verkleinert. Die dabei aufgenommene Kurve verläuft nicht nach der Neukurve, sondern auf einem höheren Induktionsniveau. Bei der Erregung Null bleibt noch eine beträchtliche Restinduktion  $B_R$  im Eisen erhalten, die Remanenzflußdichte genannt wird. Will man diese Remanenzflußdichte zu Null bringen, so muß die negative Koerzitivfeldstärke  $-H_C$  angelegt werden, die das Eisen völlig entmagnetisiert. Wird allerdings eine noch größere negative Erregung angelegt, so bewegt sich die Induktion in den negativen Bereich, wobei ebenso wie im positiven Bereich nach dem Abschalten der Erregung eine negative Remanenzflußdichte  $-B_R$  erhalten bleibt. Diese kann wiederum nur durch eine positive Koerzitivfeldstärke  $H_C$  gelöscht werden. Anhand der Hysteresekurve ist also zu erkennen, daß jede folgende Magnetisierung von der vorherigen abhängig ist

und die magnetische Vorgeschichte des Magneten für genaue Messungen wichtig ist.

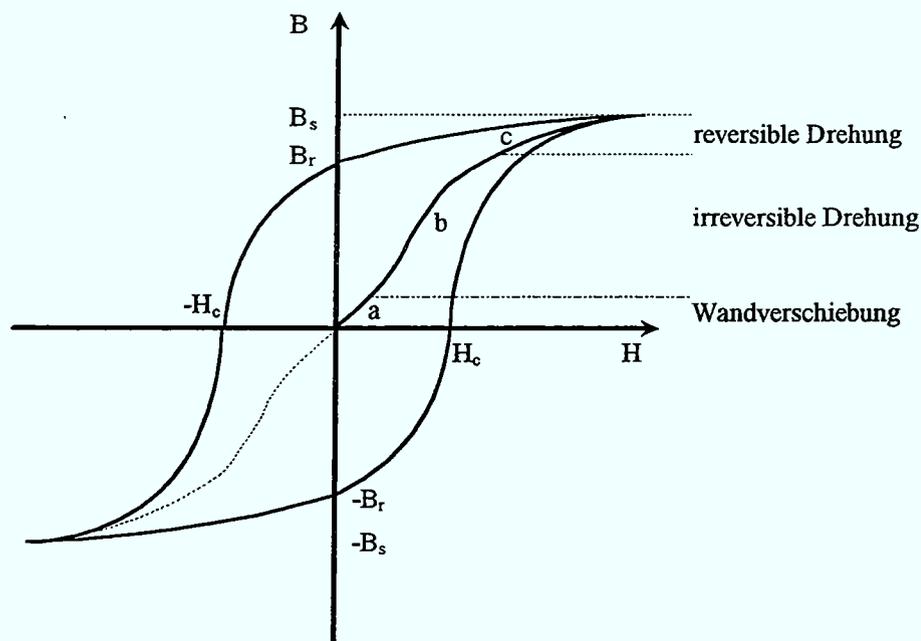
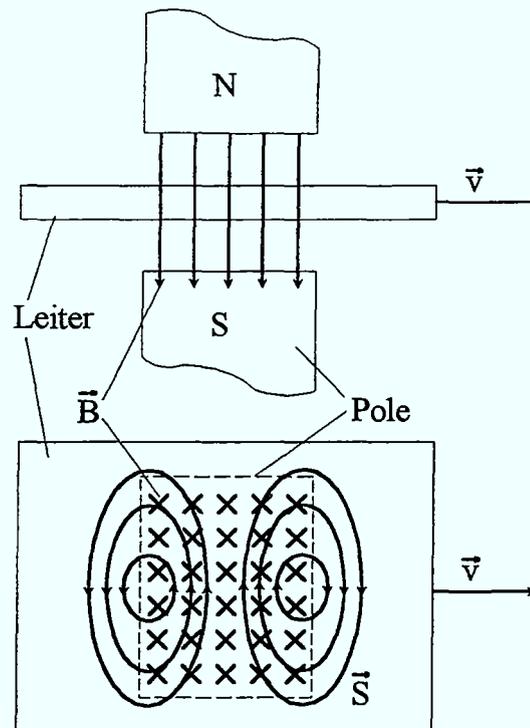


Abb. 2.6 Schematische Darstellung einer Hysteresisschleife

### 2.1.8 Die Wirbelströme

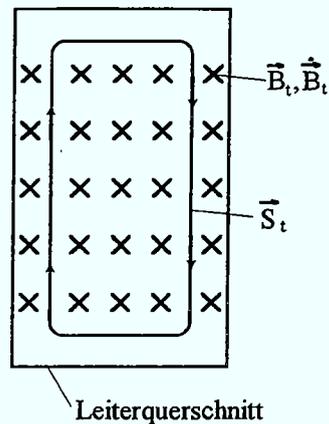
Wird ein ausgedehnter elektrischer Leiter, z.B. ein Rohr oder eine Platte, zwischen den Polen eines Magneten mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  bewegt, so entstehen in den in das Feld eintretenden bzw. aus diesem austretenden Bereichen des Leiters Umlaufspannungen. Diese haben wiederum in dem Leiter Ströme - **Wirbelströme** - zur Folge, die durch ein elektrisches Strömungsfeld  $\vec{S}$  beschrieben werden (Abb. 2.7). Dabei besagt die Lenzsche Regel (Heinrich Friedrich Emil Lenz 1804/1865), daß die Wirbelströme immer ihrer Ursache entgegengerichtet sind. Für den obigen Fall bedeutet dies, daß innerhalb des Magnetfeldes die Bewegung des Leiters gehemmt wird. Ebenfalls kommt es zur Entstehung von Wirbelströmen, sobald sich ein ausgedehnter Leiter innerhalb eines veränderlichen Magnetfeldes befindet. In diesem Fall wird das zeitveränderte Magnetfeld nur bedingt in einen leitenden Körper eindringen. Das Gegenfeld der in dem Körper verursachten Wirbelströme wirkt

dem eindringenden primären Feld entgegen, so daß im Körperinneren das Feld nur noch mehr oder weniger geschwächt auftritt.



**Abb. 2.7** Wirbelstromfeld innerhalb eines im Magnetfeld bewegten Leiters

So können beabsichtigt erzeugte Wirbelströme zur Dämpfung von Schwingungen oder zur Erzeugung kuppelnder Drehmomente (Tachometer, kWh-Zähler) ausgenutzt werden. In den meisten Fällen sind die Wirbelströme jedoch unerwünscht (Transformatoren, Motoren usw.), da ihre Joulesche Wärme als Verlustwärme verloren geht. Ein Gegenmittel besteht darin, die Wirbelstrombahnen räumlich zu begrenzen, d.h. Transformatorkerne werden aus dünnen, isolierten Blechen zusammengesetzt, da die Verlustleistung proportional dem Quadrat der Blechstärke ist. Die Überlagerung der Wirbelströme mit den im Leiter anfänglich fließenden Strömen führt zu einer asymmetrischen Stromverteilung innerhalb des Leiterquerschnittes. Dieser Effekt auch als Skin- oder Hauteffekt bekannt, macht sich durch eine Widerstandserhöhung des Leiters bemerkbar und ist aufgrund der schlechteren Materialausnutzung häufig unerwünscht. Jedoch kann dieses Verhalten auch gezielt eingesetzt werden, um z.B. Geräte gegen magnetische Wechselfelder abzuschirmen.



**Abb. 2.8** Leiterquerschnitt innerhalb eines magnetischen Feldes

Liegt ein Leiterquerschnitt, wie in **Abb. 2.8** abgebildet, innerhalb eines sich zeitlich ändernden magnetischen Feldes  $\vec{B}_t$ , so kann folgende Aussage getroffen werden. Unter der Berücksichtigung, daß hier infinitesimal kleine Bereiche betrachtet werden, kann die Inhomogenität der Randbereiche vernachlässigt werden, so daß für ein orthogonal zu  $\dot{\vec{B}}_t$  (zeitdifferenzierte Flußdichte) liegendes  $\vec{S}_t$  (Wirbelstromfeld) gilt:

$$S_t = \dot{B}_t * \chi * d$$

Wobei gilt:  $S_t$       Wirbelstromfeld  
 $\dot{B}_t$       zeitdifferenzierte Flußdichte  
 $\chi$       elektrische Leitfähigkeit  
 $d$       Leiterdicke

## Kapitel 3

### Meßaufbau

Da bei der dynamischen Magnetfeldmessung mit Meßzeiten im Bereich von Millisekunden gearbeitet wird und die Reproduzierbarkeit zwischen mehreren Messungen gegeben sein muß, ist der gesamte Meßplatz rechnergesteuert aufgebaut. Der komplette Meßplatz ist zunächst für die dynamische Vermessung eines Quadrupols konzipiert worden, dessen Meßwerte auch im Rahmen dieser Diplomarbeit ausgewertet werden. Bei dem Meßplatzaufbau wurde besonders Wert auf die Erweiterungsfähigkeit des Meßplatzes sowie auf die Anwenderfreundlichkeit des Meßplatzmenüs gelegt, so daß der Meßplatz auch für andere Magnete zur Verfügung steht. Im einzelnen wird der magnetische Fluß innerhalb eines Quadrupolmagneten wie folgt aufgenommen.

Im Magnetgap des Quadrupolmagneten wird eine Meßspule plaziert, die mit Hilfe einer CNC-Tischsteuerung beliebig verfahrbar ist. Wird der Magnet mit einer Stromrampe gespeist, deren Einstellungen von einer Workstation erfolgen, so wird gleichzeitig ein Triggerimpuls an den Funktionsgenerator gesendet. Dieser Funktionsgenerator startet daraufhin eine Folge von Burstimpulsen, die wiederum den PDI aktivieren. Der PDI nimmt dabei die Spulenspannung innerhalb des Magnetgap's auf und rechnet sie in Spulenflußänderungen um. Daneben wird vom Funktionsgenerator das DVM gestartet, welches den innerhalb des DCCT umgewandelten Stromwert der Stromrampe als Spannungswert aufnimmt. Nach Beendigung der Stromrampe werden die so ermittelten Werte unter Einsatz des Meßwertefassungsprogramm LabVIEW aus den Meßwertespeicher der Meßgeräte ausgelesen und nach entsprechender Umrechnung abgespeichert. Dabei dient LabVIEW nicht nur zur Auswertung der Meßwerte, sondern koordiniert auch den gesamten Meßablauf. Im folgenden werden die einzelnen Komponenten des Meßplatzes beschrieben, dessen Hardware-Aufbau aus der **Abb. 3.1** hervorgeht.

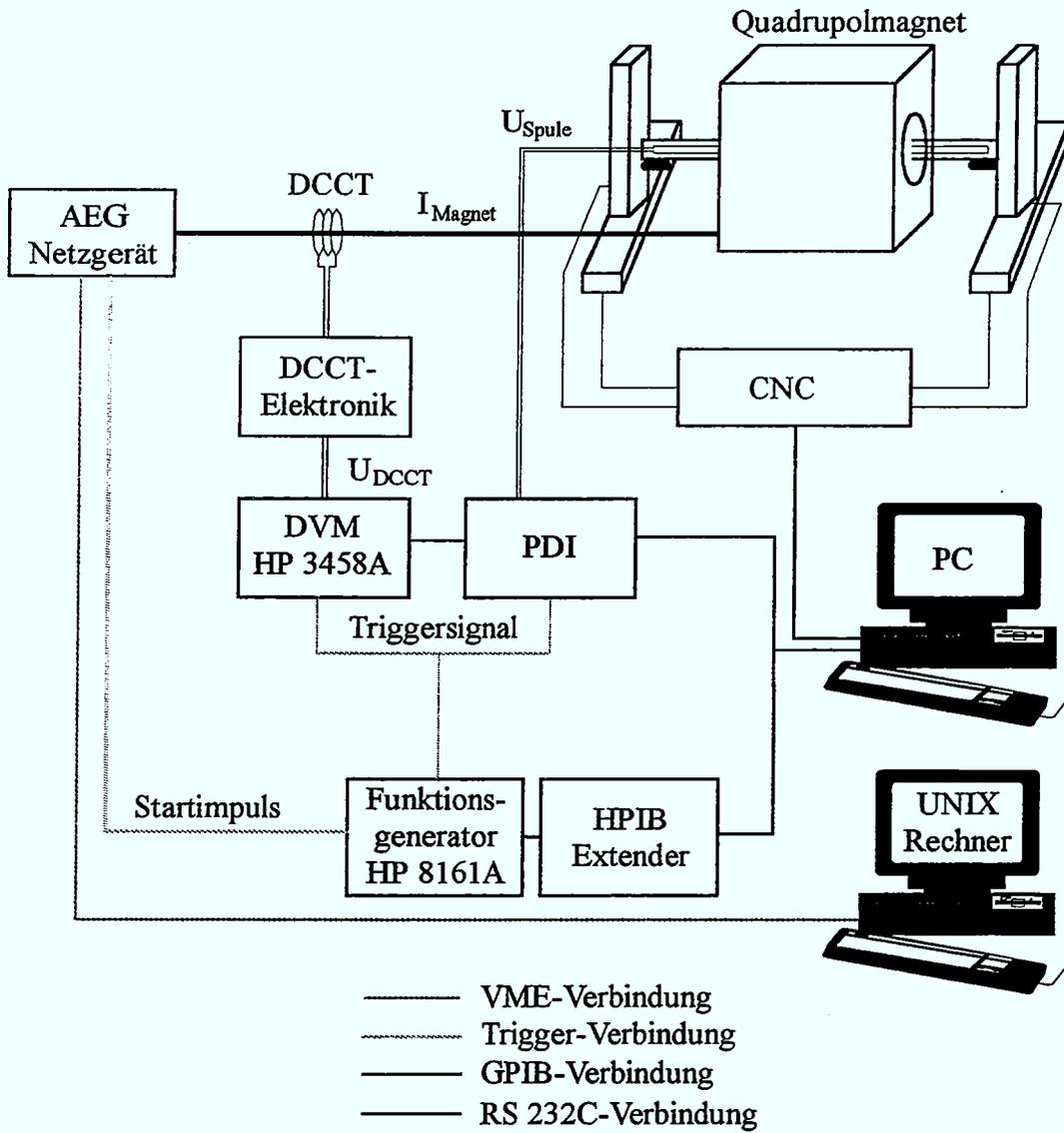
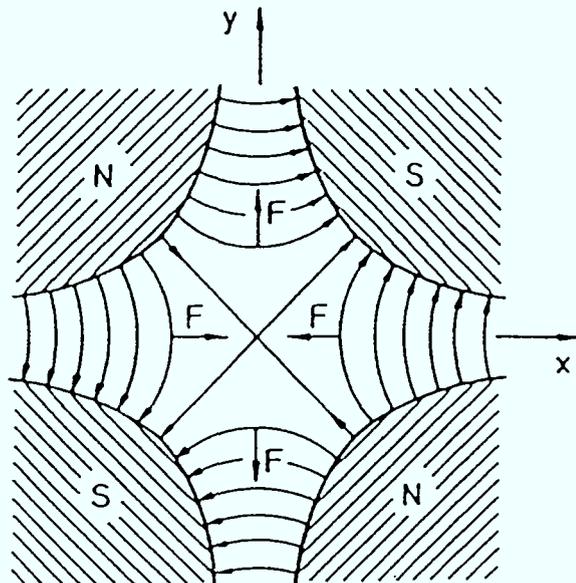


Abb. 3.1 Blockschaltbild des Meßplatzes

## 3.1 Hardware

### 3.1.1 Das Meßobjekt

Bei dem im Meßaufbau befindlichen Meßobjekt handelt es sich um einen Quadrupolmagneten mit der Bezeichnung MQT, der von der Firma Danfysik gebaut wurde. Die 4 Polschuhe des Quadrupols tragen jeweils eine Spule mit 48 Windungen. Die Windungen der Spulen bestehen aus hohlen, Wasser durchflossenen, rechteckigen Kupferrohren und sind gegeneinander isoliert. Der Multipolmagnet besitzt einen Gesamtwiderstand von  $75 \text{ m}\Omega$  und eine Gesamtinduktivität von  $70 \text{ mH}$ . Das gesamte Spulenpaket ist in Epoxidharz vergossen und erzeugt bei einem Erregerstrom von  $522 \text{ A}$  eine Induktion von  $0,65 \text{ Tesla}$  am Polschuh. Den Feldlinienverlauf eines Quadrupolmagneten - wegen seiner 4 Polschuhe auch als ein Multipolmagnet 2. Ordnung ( $n$ ) bezeichnet - ist der **Abb. 3.2** zu entnehmen. Aus dieser Abbildung wird auch ersichtlich, daß es sich um einen rotationssymmetrischen Quadrupolmagneten handelt, der sich nach einer Drehung um  $360^\circ/n$  wieder in seiner Polarität reproduziert.



**Abb. 3.2** Feldlinienverlauf eines in x-Richtung fokussierenden Quadrupolmagneten

Weitere Spulendaten sowie Magnetjochdaten zum vermessenden Quadrupolmagneten sind in der **Tabelle 8.5** im Anhang aufgelistet.

### 3.1.2 Die Meßsensoren

#### 3.1.2.1 Der Null-Fluß-Stromwandler (DCCT)

Um eine hohe Abbildungsgenauigkeit des Spulenstromes zu gewährleisten, wird für die Messung ein Nullflußstromwandler (Direkt-Current-Current-Transformer oder auch kurz DCCT) der Firma Danfysik verwendet. Dessen Wirkungsprinzip wurde 1901 von dem Physiker Ryan entdeckt. Der größte Unterschied zwischen einem DCCT zu einem Shunt besteht darin, daß der Meßspulenträger des DCCT den stromführenden Leiter umgibt und es somit zu einer galvanischen Trennung kommt. Das hat folgende Vorteile:

- Ein DCCT belastet während der Messung nicht den Meßstrom.
- Ein DCCT ist auch bei größeren Meßströmen temperaturstabil.
- Ein DCCT ist gut zu isolieren, da er nicht direkt mit dem Meßstrom in Verbindung tritt.

Daraus ergibt sich der eigentliche Vorteil des DCCT, nämlich die hohe Meßgenauigkeit, die im verwendeten System bei  $10^{-5}$  vom Meßendwert liegt. Mit Hilfe der **Abb. 3.3** soll nun das Grundprinzip eines Null-Fluß-Stromwandlers erläutert werden. [Liss79] [Danf]

Jede Stromänderung in der Primärwicklung  $W_1$  erzeugt in einem geschlossenen, aus ferromagnetischem Material bestehenden Ringkern  $T_1$  einen magnetischen Fluß  $\Phi_1$ , der wiederum in der Indikatorwicklung  $W_3$  eine Spannung induziert. Der Ausgang der Indikatorwicklung ist mit den Eingangsklemmen eines Integrators  $V$  verbunden. Die induzierte Spannung treibt den Vergleichsstrom  $I_2$  durch die, am Ausgang des Integrators liegende Sekundärwicklung  $W_2$ . Dabei ist der Wicklungssinn der Sekundärwicklung so gewählt, daß es zu einer Kompensation der beiden Flüsse im Ringkern  $T_1$  kommt. Im Idealfall, in dem der Integrator  $V$  einen unendlich großen Verstärkungsfaktor und keinen Nullpunktsdrift besitzt, würde die

in der Indikatorwicklung induzierte Spannung wieder zu null werden und der Vergleichsstrom  $I_2$  den Meßstrom  $I_1$  abbilden. Reale Integratoren besitzen allerdings nur einen endlichen Verstärkungsfaktor und eine Drift, weshalb es zu einer geringen Spannungsinduktion in der Indikatorwicklung  $W_3$  kommt, so daß der Ringkern  $T_1$  in die Sättigung getrieben wird. Aus diesem Grund werden zwei weitere Ringkerne  $T_2$  und  $T_3$  verwendet, auf denen sich die Wicklungen  $W_{3b}$  und  $W_{3c}$  befinden.

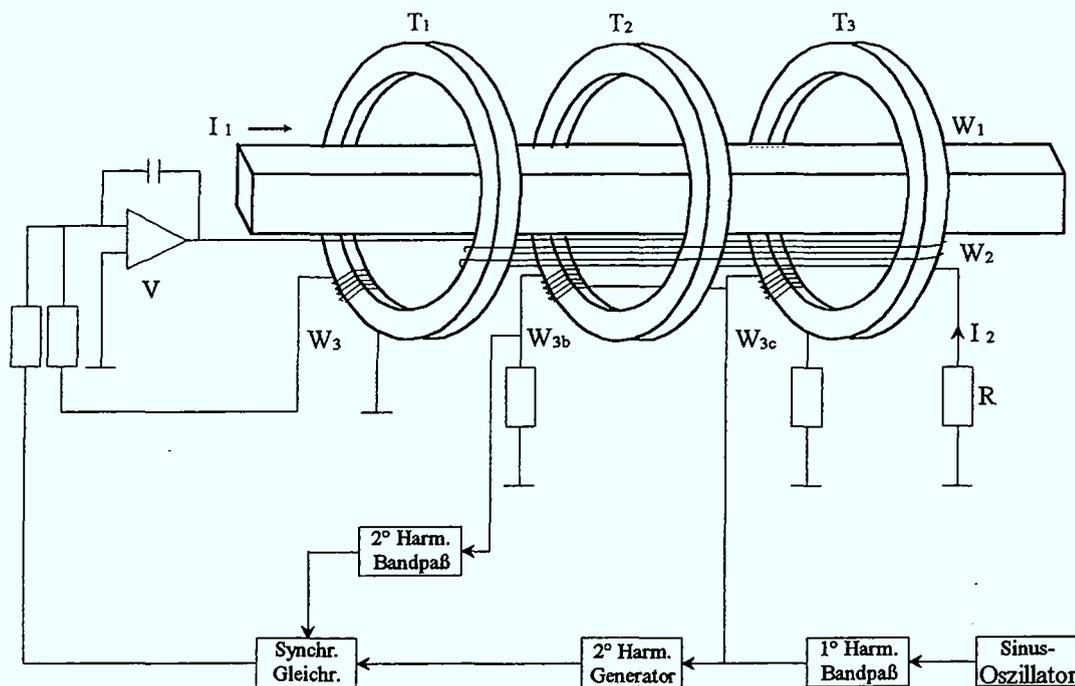


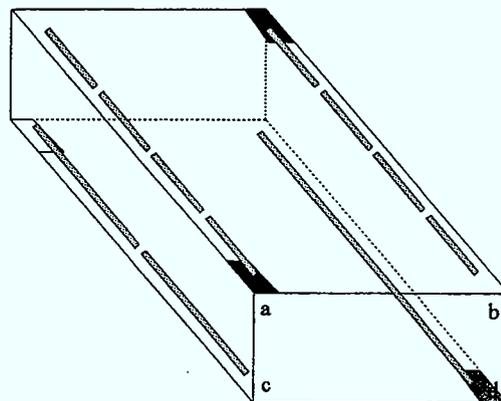
Abb 3.3 Prinzipschaltbild eines DCCT mit magnetischer Modulation

Durch Anlegen einer Sinusspannung an die Wicklung  $W_{3b}$  wird der Ringkern  $T_2$  alternierend in die positive und negative Sättigung geführt. Ist der Durchschnittswert des magnetischen Flusses ungleich Null, so liegt aufgrund des Integratordrifts eine Unsymmetrie des Magnetisierungsstromes vor. Die Unsymmetrie des magnetischen Flusses kann mit Hilfe einer Frequenzanalyse nachgewiesen werden, wobei die 2. Harmonische hierbei die wichtigste ist. Ihr Betrag ist proportional zur Abweichung und die Phasenlage gibt die Abweichungsrichtung des magnetischen Flusses an. Somit kann durch eine entsprechende Einspeisung des ermittelten Signals in den Integrator die Drift kompensiert werden. Allerdings verursacht die Sinusspannung an  $W_{3b}$  eine Rückwirkung auf den Meßstrom  $I_1$ , so daß es notwendig ist, die Wicklung  $W_{3c}$  mit der gleichen Sinusspannung zu belegen. Die

Wicklungen  $W_{3b}$  und  $W_{3c}$  unterscheiden sich nur durch ihren Wicklungssinn und kompensieren so die Rückwirkungen auf den Meßstrom  $I_1$ .

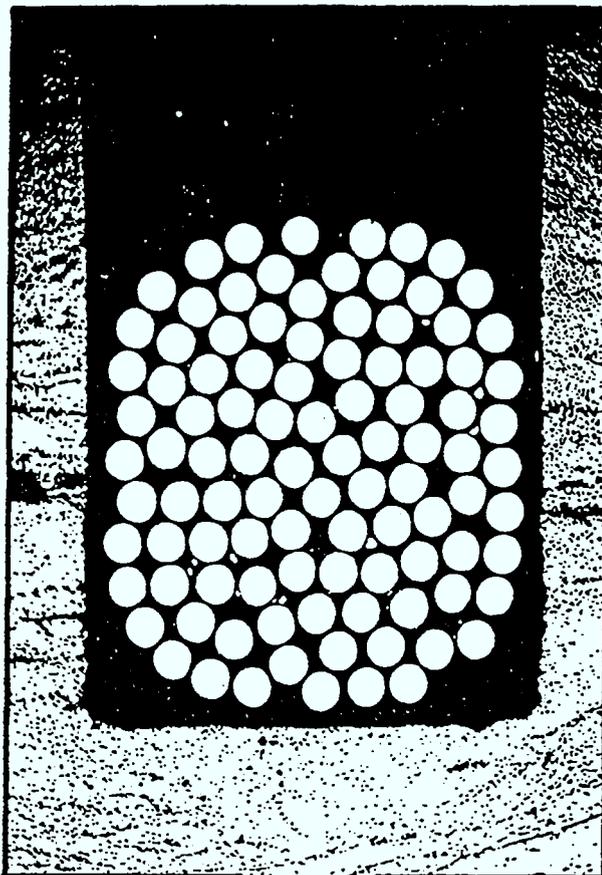
### 3.1.2.2 Die Meßspule

Die Meßspule läßt sich in zwei grobe Unterpunkte aufspalten, zum einen den Spulenträger und zum anderen den Spulensatz, der sich auf dem Spulenträger befindet. Der Spulenträger besitzt einen rechteckigen Querschnitt, dessen Fertigungsmaße in der **Tabelle 8.4.a** im Anhang aufgeführt sind. Die Oberfläche des Spulenträgers besteht aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) und ist im Inneren des Trägers mit leichtem Hartschaum ausgefüllt, um einen leichten Träger zu erhalten, der aber dennoch eine geringe Durchbiegung besitzt. In die auf der Ober- und Unterseite des Spulenträgers gefrästen Nuten ist jeweils eine 100-adrige verdrehte Hochfrequenzlitze eingedrückt worden, so daß die Leitung einen nahezu quadratischen Querschnitt hat, welcher mit Hilfe von Schliffbildern (**Abb. 3.5**) kontrolliert wurde. Der quadratische Querschnitt ermöglicht es, die X- bzw. Y- Koordinaten-Schwerpunkte zu berechnen, die für eine exakte Positionierung des Spulenträgers notwendig sind. Um den Spulenträger genau positionieren zu können, werden auf der Ober- bzw. Unterseite drei Paßhülsen aus Macor eingelassen. Bei Macor handelt es sich um eine nichtleitende und nichtmagnetische Glaskeramik, die sehr verschleißfest ist, da die Meßspitzen, die in die Paßhülsen eingelassen werden, zu jedem Ausrichten des Spulenträgers neu eingesetzt werden müssen.



**Abb. 3.4** Spulenträger mit den gelb gezeichneten Spulensätzen

Auf dem Spulenträger (Abb. 3.4) befinden sich vier Spulensätze, wobei zwei dieser vier Spulensätze in vier Spulen unterteilt sind, die in Längsrichtung hintereinander in den Spulenträger eingebettet sind. Ein Spulensatz unterteilt sich in 2 Spulen, die ebenfalls in Längsrichtung auf dem Spulenträger aufgebracht sind. Ein weiterer Spulensatz besteht aus lediglich einer Spule, die sich über die gesamte Länge des Spulenträgers erstreckt. Diese Spule, namentlich auch Spulensatz d genannt, wird in der Meßanordnung verwendet, da sie mit ihrer Länge von ca. 4,5 m (die genauen Spulendaten sind in Tabelle 8.4.b im Anhang zu finden) den gesamten Streufluß des zu messenden Magneten abdeckt und somit den gesamten Flußverlauf aufnimmt. Diese Spule besteht wie die anderen Spulen auch aus einer 100-adrigen verdrehten Hochfrequenzlitze, deren Enden zu einer Spule von 100 Windungen zusammengelötet wurden.



**Abb. 3.5** Das Schliffbild eines um 65 mal vergrößerten Spulenträgers mit einer Spuleneinbettung. Dabei zeigen die hellen Kreise die Einzeldrähte an und die hellen Punkte außerhalb der Spuleneinbettung den CFK (kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff).

### 3.1.3 Die Meßgeräte

#### 3.1.3.1 Der PDI 5025

Bei einer Spannungszeitintegral-Messung kurzer Zeitintervalle treten Meßtötzeiten auf, in denen der Integrator sein Ergebnis in den Meßwertspeicher gibt, der Integrator neu einschwingt oder es zu Trigger-Verzögerungszeiten kommt. Aus diesem Grund wird ein High Precision Digital Integrator (PDI) verwendet, um die Spannungsänderung in der Meßspule zu ermitteln. Bei dem verwendeten PDI ist die Meßtötzeit ( $\leq 1 \mu\text{s}$ ) im Vergleich zur Integrationszeit (minimal 1 ms) vernachlässigbar klein, so daß hier von einer totzeitfreien Integration gesprochen werden kann. Der PDI 5025 der Firma Metrolab [Metro91], der im Meßaufbau verwendet wird und dessen Prinzipschaltbild in **Abb. 3.6** zu sehen ist, arbeitet nach folgendem Prinzip. Die anliegende Meßspannung wird auf einen Bereich von  $\pm 5 \text{ V}$  verstärkt und mit einer hochgenauen 5 V Spannung beaufschlagt, so daß eine positive Ausgangsspannung entsteht, die im Bereich von 0 - 10 V liegt. Diese Ausgangsspannung wird einem VFC (Voltage to Frequency Converter) zugeführt, der eine spannungsabhängige Frequenz erzeugt, deren Pulszahl gezählt und weitergehend in dem Zählregister 1 als Zahlenwert abgelegt wird. Parallel dazu wird in dem Zählregister 2 die Pulszahl einer Referenzfrequenz abgespeichert, die der 4-fachen Frequenz der Null-Volt-Eingangsspannung entspricht. Nach dem nächsten Triggerimpuls werden die Register 1 und 2 durch die Register 3 und 4 ersetzt und die Registerinhalte der Register 1 und 2 können ausgelesen und nach folgender Gleichung in den Flußwert umgewandelt werden:

$$\Delta\Phi = \int_{t_1}^{t_2} U_q dt = \frac{4 \cdot N - N_{\text{ref}}}{4 \cdot C \cdot G} \cdot 10^8$$

Hierbei entspricht: N Registerinhalt 1 oder 3  
 $N_{\text{ref}}$  Registerinhalt 2 oder 4  
 G Verstärkungsfaktor des Vorverstärkers  
 C Umwandlungsfaktor des VFC in  $\frac{\text{Hz}}{\text{V}}$

Der Faktor  $10^8$  deutet an, daß die Flußänderung als ein Wert in der Größenordnung  $10^{-8} \text{ Vs}$  im Meßwertspeicher gespeichert wird.

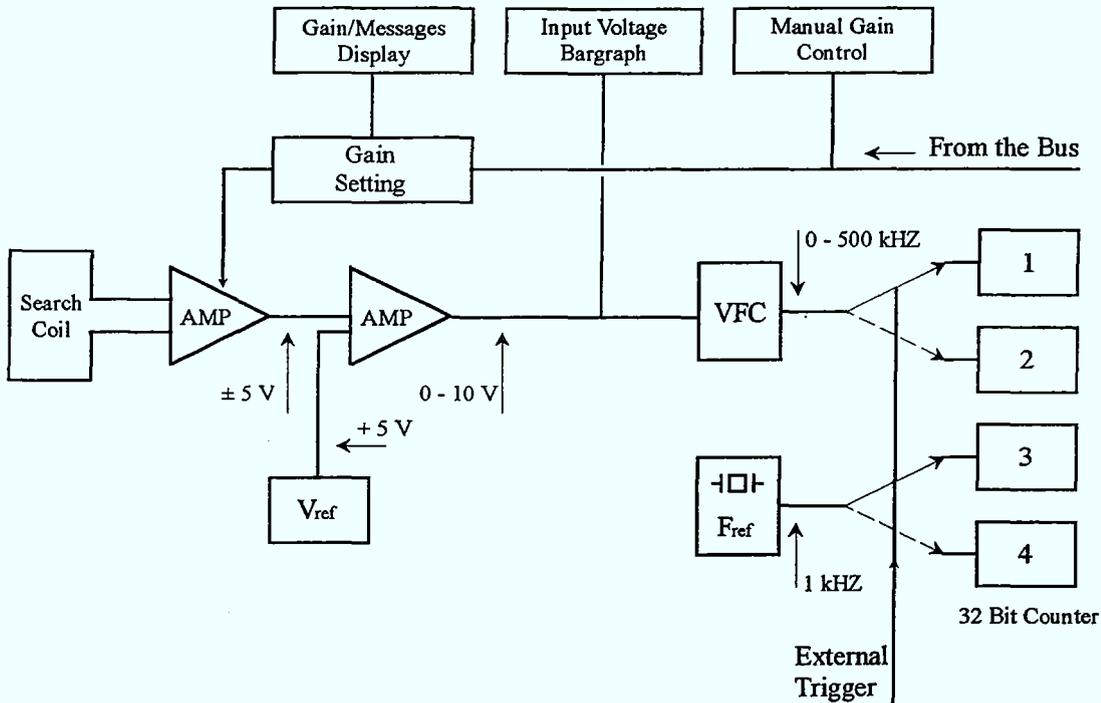


Abb. 3.6 Prinzipschaltbild eines Precision Digital Integrator (PDI 5025)

Die zur Initialisierung des PDI's benötigten Befehle sind im Anhang in der **Tabelle 8.3** aufgelistet und mit einer kurzen Beschreibung des Befehls versehen. Die Initialisierung erfolgt fernbedienbar über die IEEE-488 Schnittstelle des Integrators (auch als GPIB oder HPIB Schnittstelle bekannt). Im folgenden sind einige für die Messung wichtige Kenndaten des PDI's aufgeführt, wobei eine genauere Fehlerbetrachtung des PDI in **Kapitel 5.1** vorgenommen wird.

Eingangsspannung	$\pm \frac{5\text{ V}}{\text{Gain}}$
maximal erreichbare Auflösung	$\frac{20\ \mu\text{Vs}}{\text{Gain}}$
Überspannungsschutz	$\pm 45\text{ V}$ oder kurzzeitig $600\text{ V}$
mögliche Verstärkungsfaktoren	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000
externe Trigger	TTL auf steigende oder fallende Flanke
Meßwertspeicher	5200 Meßwerte in der Einheit $10^{-8}\text{ Vs}$

### 3.1.3.2 Das DVM HP 3458A

Bei dem HP 3458 Digital-Volt-Multimeter (DVM) der Firma Hewlett Packard handelt es sich um ein Präzisionsspannungsmeßgerät, das mit einem Analog-Digital-Wandler arbeitet und die Spannungen nach einem modifizierten Zweirampenverfahren (Dual - Slope) in digitale Signale umwandelt [HPDVM]. Ebenfalls ist es möglich, mit dem DVM Gleich- und Wechselströme sowie Widerstände zu messen. Unter Zuhilfenahme des Speichers und des internen Prozessors, der einen umfangreichen mathematischen Befehlssatz besitzt, ist das DVM in der Lage, verschiedene mathematische Funktionen auszuführen, wie z.B. die Mittelwertbildung einer Meßreihe oder die prozentuale Abweichungsberechnung der Meßwerte von einem einzugebenden Richtwert. Die Bedienung des Gerätes kann sowohl direkt über die Fronttastatur als auch über eine IEEE-488 Schnittstelle ferngesteuert erfolgen. Im Meßaufbau wird das DVM zur Gleichspannungsmessung der DCCT-Spannung eingesetzt. Die dafür erforderlichen Initialisierungseinstellungen sind im Anhang in der **Tabelle 8.1** aufgelistet und kurz beschrieben.

Wichtige Kenndaten für die Messung sind:

maximale Abweichung	100 nV
Eingangsimpedanz	> 10 GΩ
Temperatur Koeffizient/°C	0,5 + 0,01 (ppm des Meßwertes + ppm des Meßbereiches)
Zeitstabilität für 24 Stunden	0,5 + 0,05 (ppm des Meßwertes + ppm des Meßbereiches)

Die Kennwerte beziehen sich auf einen 10 V Gleichspannungsbereich, wie er im Meßablauf benutzt wird und werden in **Kapitel 5.2** näher betrachtet.

### 3.1.4 Die Ansteuerungen

#### 3.1.4.1 Das AEG-Netzgerät

Das AEG-Netzgerät hat die Aufgabe, die Stromrampe für die dynamische Vermessung des Quadrupolmagneten zu liefern. Dabei besitzt es die Vorgabe, die Stromrampe mit einer Genauigkeit von  $8 \cdot 10^{-4}$ , bezogen auf den Vorgabewert, zu erzeugen. Um diese Bedingung zu erfüllen, ist das Netzgerät aus zwei parallelgeschalteten Einzelspeisungen aufgebaut (siehe Abb. 3.7):

- einer 6-Puls-Brückenschaltung
- einer Paralleleinspeisung (PE)

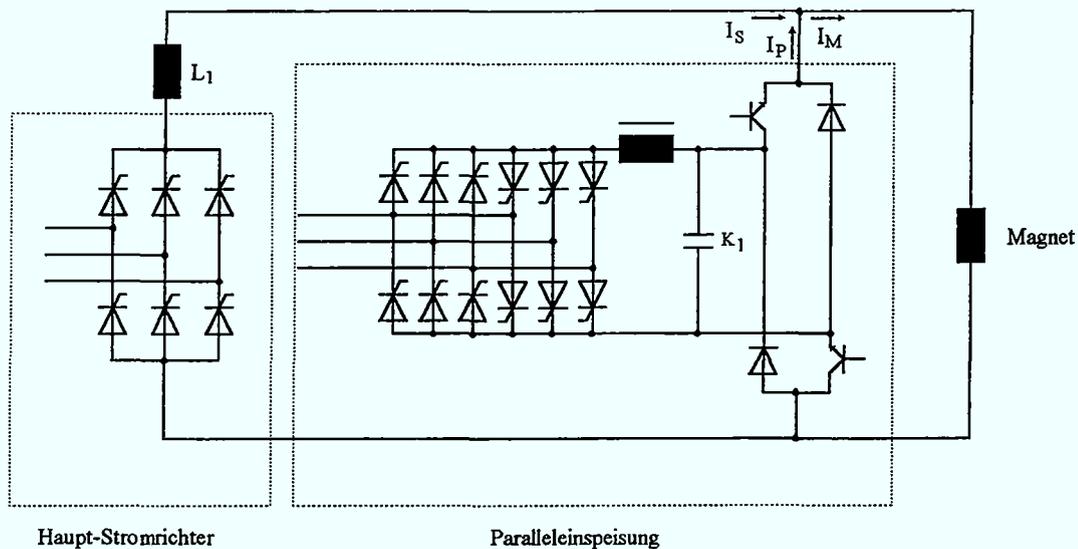
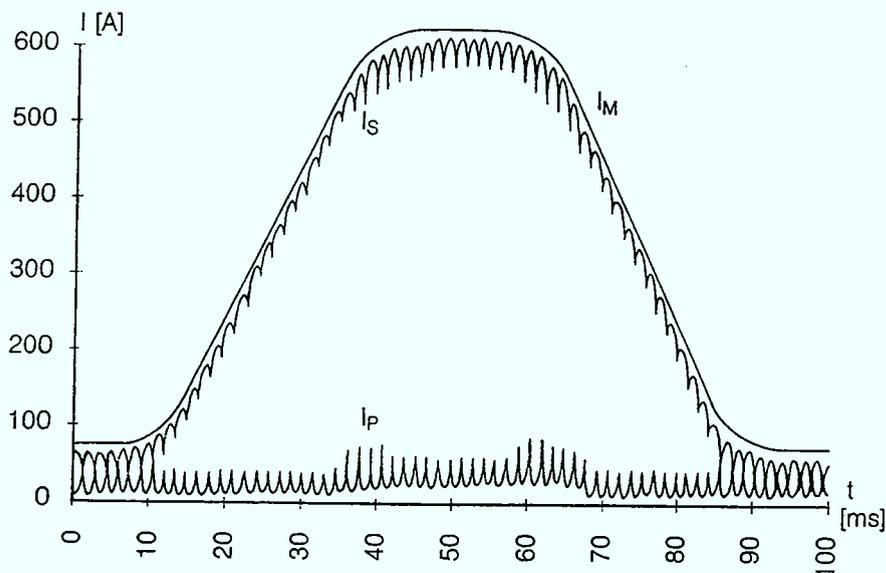


Abb. 3.7 Prinzipschaltbild der Magnetstromversorgung

Der Hauptanteil des Rampenstromes wird von dem 6-Puls-Brückenstrom  $I_S$  geliefert (siehe Abb. 3.8). Die genauer arbeitende Paralleleinspeisung liefert den Reststrom  $I_P$ , der im wesentlichen aus dem bedingten Wellenanteil der 6-Puls-Brückenschaltung besteht. Wird dieser Reststrom zum 6-Puls-Brückenstrom  $I_S$  addiert, so ergibt sich die Stromrampe  $I_M$ .



**Abb. 3.8** Stromrampenaufbau mit einer 12-pulsigen Brückenschaltung als Hauptstromrichter.

### 3.1.4.2 Der Puls-/Funktionsgenerator HP 8161A

Bei dem HP 8161A handelt es sich um einen Puls-/Funktionsgenerator, ebenfalls von der Firma Hewlett Packard [HPPuls]. Eine Erweiterung mit der Option 001 bietet die Möglichkeit der frei wählbaren Anzahl von Burst Perioden, die wahlweise für die interne oder externe Triggerung benutzt werden können. Im Meßaufbau wird der Puls-/Funktionsgenerator benutzt, um eine zeitgleiche Triggerung des HP 3458A und des PDI vorzunehmen und somit zeitlich vergleichbare Meßwerte zu erhalten. Das ist mit einer Folge von Softwaretriggern nicht möglich, da die beiden Geräte unterschiedliche Ansprechzeiten für den Eingang eines Softwaretriggerimpulses besitzen. Wie die anderen Geräte ist der Puls-/Funktionsgenerator mit einer IEEE-488 Schnittstelle ausgerüstet, so daß alle Befehle auch fernbedienbar sind. Die für die Initialisierung benötigten Befehle sind im Anhang unter **Tabelle 8.2** aufgelistet und beschrieben, während nachfolgend einige für den Meßaufbau wichtige Kenndaten aufgeführt sind.

Impulsbreite	10 ns bis 999 ms
Auflösung	3 Stellen

Genauigkeit	$\pm 5\%$ der Einstellung $\pm 2$ ns
Reproduzierbarkeit	Um den Faktor 4 besser als die Genauigkeit
Anzahl der Burstimpulse	1 bis 1999
minimaler Abstand der Bursts	100 ns
Anstiegs-/Abfallszeit	$< 7$ ns (10% bis 90% der Amplitude)
Verzerrungen	$< \pm 5\%$ der Amplitude $\pm 2$ mV

Alle Angaben beziehen sich auf den Impulsbetrieb, der im Meßaufbau benutzt wird, wobei auch hier in **Kapitel 5.3** eine genauere Betrachtung der Fehler vorgenommen wird.

### 3.1.4.3 Die Tischsteuerung

Um die Meßspule im Magneten positionieren zu können, wird der Spulenträger von zwei Tischen, die je in 2 Achsen verfahrbar sind, in dem Magneten bewegt. Die Tische sind auf zwei Granitplatten verschraubt, wobei die Granitplatten wiederum auf jeweils fünf Justierfüßen stehen. Unter den Justierfüßen befindet sich auf jeder Tischseite ein Betonquader, mit dessen Hilfe die Schwingungen der Positioniereinrichtung so gering wie möglich gehalten werden.

Die Tische werden von Schrittmotoren der Firma Berger-Lahr bewegt, die dem Tisch einen Fahrweg von 1000 mm in horizontaler und 160 mm in vertikaler Richtung bei einer Positionsgenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm ermöglichen. Dabei muß eine Tischposition aufgrund des Spindelspiels immer von der gleichen Richtung aus angefahren werden, um diese Genauigkeit zu erreichen. Ist dieses nicht der Fall, liegt die Genauigkeit der Positionierung bei  $\pm 0,1$  mm. Jede Tischachse besitzt einen elektronischen Referenzpunkt, der bei dem jeweiligen Nullpunkt einer jeden Achse liegt. Wird der Referenzpunkt angefahren, so fährt die Achse zunächst über diesen Referenzpunkt hinaus auf einen induktiven Näherungsschalter; so wird gewährleistet, daß der Referenzpunkt immer von der gleichen Seite angefahren wird. Außerdem besitzen die induktiven Näherungsschalter die Aufgabe, bei einer falschen Positionierungsangabe die Tische vor Beschädigung zu schützen. Die Positionierung schaltet ab, sobald der Näherungsschalter belegt wird.

Eine Steuerung der Tische ist sowohl über das Frontbedienfeld der SM2000 CNC Steuerung der Firma SM [SM2000] als auch über den Rechner möglich. Bei dieser CNC (Computer Numerical Control) Steuerung handelt es sich um eine universell einsetzbare Steuerung für Schritt- und Servomotoren, die im Meßaufbau zunächst die Leistungsendstufen der Firma Middex ansteuert, die wiederum die Schrittmotoren ansprechen. Das Herzstück der Tischpositionierung ist die mit einem 8 bzw. 16 Bit Prozessor arbeitende CNC. Sie kann bis zu 8 Ausgänge überwachen und besitzt einen 65 kB RAM Arbeitsspeicher. Mit einer zusätzlichen Erweiterung der CNC (in vier weiteren EPROM's ist eine Software gespeichert) ist es möglich, über die Schnittstelle eine Statusabfrage sowie eine stationäre Positionsabfrage der CNC durchzuführen. Wie alle anderen Geräte ist die CNC vom Rechner aus bedienbar, besitzt im Gegensatz zu allen anderen benutzten Geräten aber eine serielle Schnittstelle (RS 232C). Aus diesem Grund ist darauf zu achten, daß die Schnittstellenparameter der CNC eingestellt werden müssen, bevor die CNC zum ersten Mal fernbedient werden kann.

Die Schnittstellenparameter lauten:

- Parität: gerade
- Übertragungsrate: 9600 Byte/sec (Baud)
- Anzahl der Datenbits: 7
- Anzahl der Stopbits: 2

#### 3.1.4.4 Der Personal-Computer (PC)

Bei dem PC der für die Steuerung des Meßablaufes verwendet wird, handelt es sich um einen 100 MHz Intel-Pentium-Prozessor, der mit einem Arbeitsspeicher von 16 MB RAM ausgerüstet ist. Ferner besitzt der Rechner zwei Festspeicherplatten die je eine Speicherkapazität von 1 GB besitzen, wobei die zweite Festplatte als Backup-Speicher der anderen Festplatte dient. Darüber hinaus ist eine IEEE 488.2-Schnittstellenkarte der Firma National Instruments installiert, die im Meßaufbau die Schnittstelle zwischen dem PC und den Meßgeräten - HP 3458A DVM, HP 8161A Puls-/Funktionsgenerator und PDI - darstellt.

Diese parallele Schnittstelle (auch häufig GPIB- oder HPIB- Schnittstelle genannt) ist aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit bei Meß- sowie auch Netzgeräten sehr verbreitet. Dabei besteht dieses Schnittstellensystem aus acht parallelen Datenleitungen: drei Steuerleitungen, die für die Kommunikation zwischen den angeschlossenen Geräten zuständig sind, und fünf Leitungen für die allgemeine Schnittstellensteuerung. Bei der Benutzung einer IEEE-488 Schnittstelle müssen folgende Grundregeln beachtet werden:

- Es können üblicherweise maximal 15 Geräte über eine Schnittstellenkarte betrieben werden.
- Die Länge sämtlicher Datenleitungen darf 15 Meter nicht überschreiten, wobei die Einzelverbindungen kleiner als 3 Meter sein sollten.
- Jedes Gerät muß mit einer spezifischen Geräteadresse im Bereich von 0 - 30 ausgerüstet sein, wobei es zu keinerlei Doppeladressierung kommen darf.

Die Einschränkung der Datenleitungslänge vom Rechner zum Gerät kann allerdings durch die Verwendung von HPIB-Bus-Extendern, die parallele Daten in serielle Daten umwandeln und umgekehrt, aufgehoben werden. Zwischen zwei Bus-Extendern ist eine über 100 Meter lange Verbindung mit RG 59 U Kabeln ( $75 \Omega$ ) zulässig, so daß auch entfernt liegende Prozeßabläufe vom Rechner gesteuert werden können. Allerdings fällt mit steigender Kabellänge die mögliche Übertragungsrate stark ab.

Außerdem wird eine der standardmäßig installierten zwei seriellen RS 232C Schnittstellen für die Ansteuerung der CNC-Steuerung verwendet.

Bei der seriellen Schnittstelle werden die Daten nicht byteweise, sondern als Folge einzelner Bits über eine Signalleitung übertragen, daher werden weniger Leitungen benötigt als bei der Parallelschnittstelle. Bei der Ansteuerung der CNC im speziellen Fall sind lediglich 3 Leitungen notwendig. Es werden die **TXD** (Transmit Data) sowie **RXD** (Receive Data) und die **GND** (Signal Ground) Anschlüsse belegt. Ebenso wie bei der IEEE-488.2 Schnittstelle ist auch bei der RS 232 Schnittstelle die Datenübertragungsrates stark von der Kabellänge abhängig und liegt bei dem im Meßaufbau benutzten System bei 20 kbit/s bei einer maximalen Leitungslänge von 15 Metern.

## 3.2 Software

### 3.2.1 LabVIEW

Um den Meßablauf des Magnetfeldmeßplatzes zu kontrollieren, wird **LabVIEW** für Windows 3.01 (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench), ein universeller graphischer Compiler der Firma National Instruments, eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine Software, die „alle Elemente einer modernen graphischen Benutzeroberfläche, neben verschiedenen Treibern für Meßgeräte und Computer-Schnittstellen, mit den Elementen der klassischen Programmiersprachen (wie z.B. C, FORTRAN, PASCAL etc.) verbindet.“ [Dahn: Praxisbuch LabVIEW Seite 5]

Für den Anwender besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die mit Hilfe von LabVIEW aufgenommenen Meßwerte mathematisch oder auch graphisch auszuwerten bzw. weiterzuverarbeiten. LabVIEW ist so aufgebaut, daß ein VI (Virtuelles Instrument) aus einem Bedien-Panel und einem Diagramm-Panel besteht. Ein VI ist ein in sich abgeschlossenes und lauffähiges LabVIEW-Programm, das jeweils für eine Routine steht.

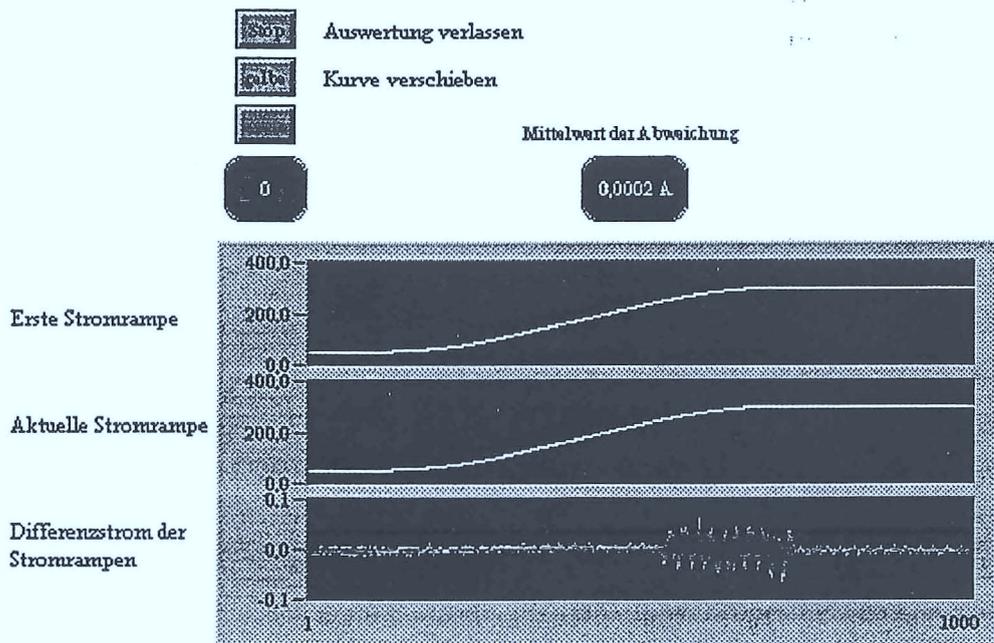


Abb. 3.9 exemplarische Abbildung eines Bedien-Panel aus dem Meßprogramm

Dabei beinhaltet das Bedien-Panel (Abb. 3.9) die Möglichkeit der Oberflächengestaltung sowie die Gestaltung der Kontrollelemente einer LabVIEW-Anwendung. Es läßt sich somit mit dem Front-Panel eines Meßgerätes vergleichen. In dem Diagramm-Panel (Abb. 3.10) wird die graphische Programmierung der LabVIEW-Anwendung vollzogen, was vergleichsweise dem „Innenleben“ eines Meßgerätes entspricht.

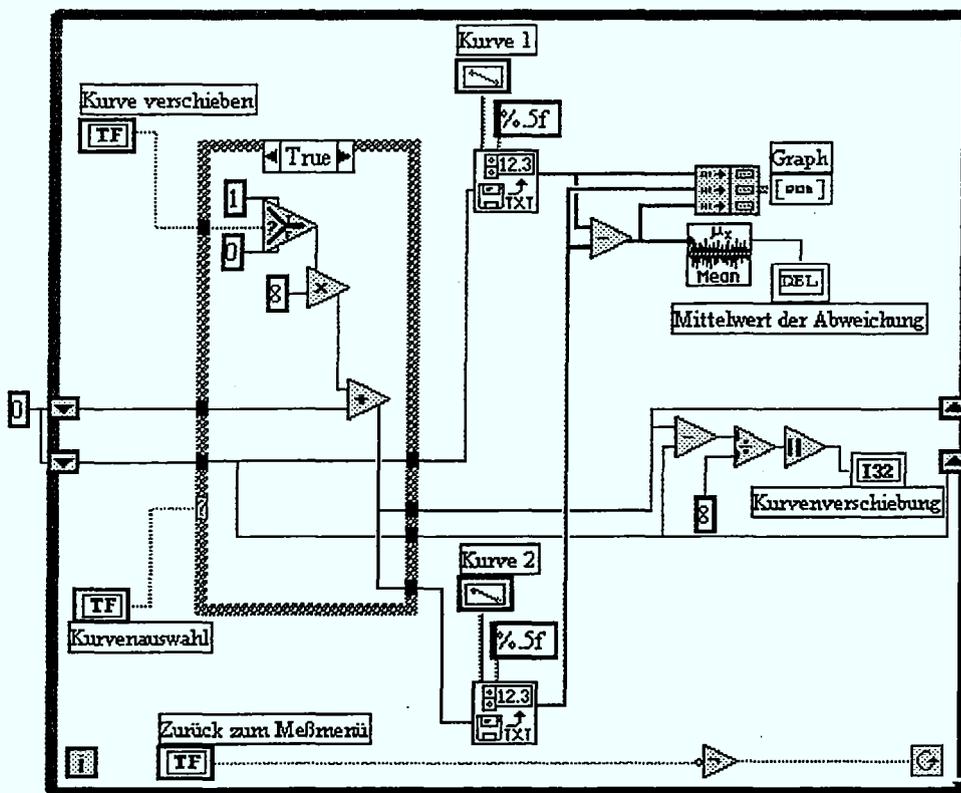


Abb. 3.10 exemplarische Abbildung eines Diagramm-Panel aus dem Meßprogramm

Die verschiedenen VI's werden mit graphischen Leitungen verbunden, um ein lauffähiges Programm zu erhalten. Hierbei stehen dem Programmierer verschiedenste Anwenderwerkzeuge zur Verfügung, die bereits in verschiedenen Bibliotheken vom Hersteller mitgeliefert werden. So sind unter anderem Routinen (VI's) vorhanden, mit denen der Programmierer in die Lage versetzt wird, unterschiedliche mathematische Analysen vorzunehmen, Werte in einer Datei abzuspeichern oder über die Rechnerschnittstellen mit verschiedenartigen Meßgeräten in Verbindung zu treten. Desweiteren wird dem Bediener von LabVIEW die Möglichkeit

gegeben, eigene Anwendungsprogramme in die Bibliothek einzubinden, um diese in ein anderes Anwendungsprogramm importieren zu können und somit als Sub-VI zu benutzen. Für eine genauere Beschreibung der LabVIEW-Software wird hier auf die Literaturquellen LabVIEW for Windows (User Manual) [NaIn93] und Praxisbuch für LabVIEW [Dahn 93] verwiesen.

## Kapitel 4

### Meßablauf

Da mehrere Messungen notwendig sind, um eine Aussage über das dynamische Verhalten eines Quadrupolmagneten treffen zu können, unterliegt der Meßablauf einer Programmsteuerung. Die Steuerung wird für die exakte Positionierung der Meßspule, die zeitlich richtige Ansteuerung der Meßgeräte und die Meßwertauslesung eingesetzt.

Dabei läßt sich der Meßablauf in die folgenden drei Abschnitte unterteilen:

- Voreinstellungen des Bedieners
- Magnet- und Spulenträgerjustierung
- Meßmenü der dynamischen Magnetfeldmessung

#### 4.1 Voreinstellungen

Zu den Voreinstellungen gehört die Eingabe des Operatornamens und des Paßworts. Der Operatorname dient dokumentarischen Zwecken, für ein später zu erstellendes Meßprotokoll. Vor dem Meßmenü ist ein Paßwortschutz programmiert, um die Zugangsberechtigung zu dem Meßprogramm kontrollieren zu können. Nach der Paßworteingabe wird dem Operator die Option gegeben, das Paßwort zu ändern, um somit die höchstmögliche Sicherheit gegen unbefugtes Benutzen zu gewährleisten.

#### 4.2 Das Hauptprogramm

Nach den Voreinstellungen gelangt der Operator in das Hauptmenü mit folgenden Unterpunkten:

- Programm verlassen
- Justieren der Spulen

- Magnetfeldmessung
- Auswerten der Meßdaten

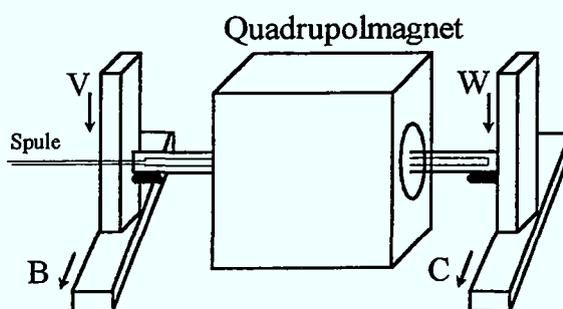
### 4.2.1 Programm verlassen

Nach der Anwahl des Programmpunktes **Programm verlassen** stoppt LabVIEW das Meßprogramm und ermöglicht dem Bediener, den Meßablauf zu beenden.

### 4.2.2 Justieren der Spulen

Mit dem Unterprogramm **Justieren der Spulen**, wird der Magnet sowie der Spulenträger für die Messungen ausgerichtet. Der Ablauf stellt sich folgendermaßen dar:

Zunächst ist auch hier ein Paßwortschutz programmiert worden, damit dieser Programmabschnitt nur für speziell autorisierte Bediener zugänglich ist. Wird das eingegebene Paßwort akzeptiert, erscheint eine Aufforderung zur Entnahme des Spulenträgers. Anschließend starten die Tischachsen zu einem Referenzlauf, indem alle Tischachsen in ihre Ursprungsposition (Nullposition) gefahren werden (siehe **Abb. 4.1**).



**Abb. 4.1** Tischpositionierung mit den dazugehörigen Achsenbezeichnungen

Sobald dieser beendet ist, verfahren die Tische in ihre Meßendposition, d.h. die Achsen B und C verfahren zu der Koordinatenposition 950 und die Achsen V und W verfahren zu der Koordinatenposition 125. An diesen Punkten kann mit Hilfe

eines Geodäten und dem in 0,1 mm bzw. 3 mm Schritten verfahren der Positionierte der Spulenträger parallel zu dem zu vermessenden Magneten ausgerichtet werden. Ist der Vorgang abgeschlossen, so werden die ermittelten Tischkoordinaten in Hilfsdateien abgespeichert und die Tische automatisch auf die horizontalen Mittelpositionen der B und C Achsen verfahren. Dabei werden die vertikalen Achsen auf ihrem eingestellten Niveau gehalten und die horizontalen Achsen auf den Koordinatenpunkt von 240 verfahren. In der Mittelposition wird wiederum mit Hilfe eines Geodäten der Spulenträger in die Mitte des Magneten positioniert. Bei dieser Einstellung ist es nur noch möglich, die Tischachsen in den gleichen Schrittweiten wie bereits oben angegeben parallel zu verfahren. Diese Koordinatenpunkte werden in Hilfsdateien abgespeichert und nachfolgend als Startpunkte für die Messungen benutzt.

### 4.2.3 Magnetfeldmessung

Nachdem der Spulenträger zum zu vermessenden Magnet positioniert ist, kann der Bediener nach Auswahl des Menüpunktes **Magnetfeldmessung** zwischen verschiedenen Meßverfahren wählen. Es ist allerdings nicht zwingend erforderlich, vor dem Start einer Magnetfeldmessung den Programmabschnitt **Justieren der Spulen** durchlaufen zu haben, da die Tischmittelpositionen zum Start des Meßablaufes aus den Hilfsdateien entnommen werden. In dem Menüpunkt Magnetfeldmessung wird dem Bediener die Möglichkeit gegeben, unter verschiedenen Meßverfahren auszuwählen:

- Messung B(I) statisch
- Messung B(I) dynamisch
- Messung Integral Bdl
- Feldmessung mit einer NMR

Bislang ist lediglich die im Rahmen der Diplomarbeit programmierte **Messung B(I) dynamisch** anwählbar.

Nach Anwahl der **Messung B(I) dynamisch** startet LabVIEW das Unterprogramm „Dynamische Messung“. Dabei eröffnet sich dem Bediener ein Menüfenster, das die Eingabe der spezifischen Meßeinstellungen erlaubt:

- **Magnetname**

Der Magnetname dient im Programmverlauf der Bildung eines Speicherpfades, in dem die Meßwerte abgespeichert werden. Der komplette Speicherpfad sieht wie folgt aus:

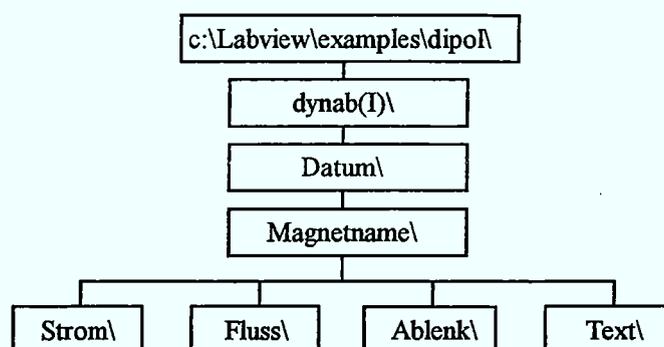


Abb. 4.2 Verzeichnisstruktur der Speicherpfade

...Dynab(I) [kennzeichnet die dynamische Messung] \\Datum [Aktuelles Datum der Messung] \\Magnetname [Name der Meßreihe] \\Strom [Ablagepfad für die Stromwerte] bzw. Fluss [Ablage für die Flußdifferenzwerte] bzw. Ablenk [Ablage für die Ablenkstärkenwerte] bzw. Text [Speicherpfad für das Meßprotokoll]

- **Endstrom**

Die Eingabe des Endstromes dient dem Meßprotokoll, das im Anhang **Kapitel 8.9** beispielhaft vorliegt.

- **Stromsteilheit**

Die Stromsteilheit dient ebenfalls dokumentarischen Zwecken

- **Anfangsstrom**

Der Anfangsstrom wird gleichermaßen für das Meßprotokoll verwendet

- **Meßradius**

Der Meßradius gibt den Radius an, innerhalb dessen sich die Meßpunkte um den Meßmittelpunkt befinden. So ist aufgrund des Vakuumrohrdurchmessers von 150 mm und des rechteckigen Querschnitts des Meßspulenträgers ein maximaler Meßradius von 55 mm möglich. Hierbei ist es allerdings notwendig, daß der Meßspulenträger innerhalb des Meßablaufes gedreht wird, damit der Spulensatz d immer möglichst nahe an der Rohrwandung des Vakuumkammerrohres liegt. Zur Erleichterung der Verständigung zwischen PC und Operator, wie der Spulenträger zu drehen ist, wurde der Meßträger mit Farbmarkierungen versehen.

Wird jedoch der Meßradius  $\leq 25$  mm gewählt, ist es nicht erforderlich, den Meßspulenträger zu drehen, um alle Meßpunkte anfahren zu können.

- **Meßschrittweite**

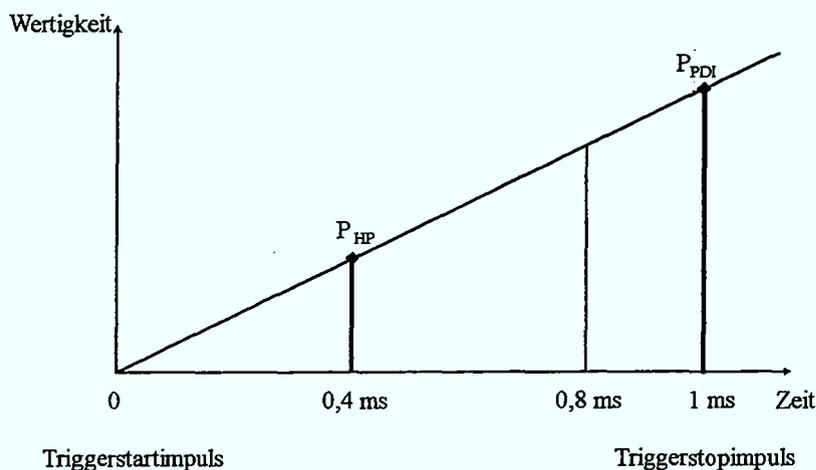
Die Meßschrittweite dient der Festlegung der Meßabstände, in der die Meßspule das Meßraster durchfährt.

- **Winkelabstände**

Die Winkelabstandseingabe fungiert zur Festlegung der Winkelpositionen, in denen während einer Meßreihe die Meßraster durchlaufen werden. Dabei wird während einer Meßreihe zunächst immer das Meßraster abgearbeitet, bevor die nächste Winkelposition angefahren wird.

- **Meßfrequenz**

Mit der Meßfrequenz wird die Taktfrequenz des Puls-/Funktionsgenerators eingestellt. Diese Taktfrequenz ist maßgeblich für die Integrationszeiten des PDI und die Meßabstände der Strommessung. Allerdings sind die ermittelten Stromwerte sowie die Integrationswerte des PDI nicht punktuell vergleichbar. Um die zeitliche Verschiebung der Meßwerte zu veranschaulichen, werden die in **Abb. 4.3** dargestellten Meßpunkte näher erläutert.



$P_{HP}$  = Meßwert des HP 3458A DVM  
 $P_{PDI}$  = Meßwert des PDI

**Abb. 4.3** zeitliche Darstellung der ermittelten Meßwerte

Um kurze Meßzeiten, wie sie im Meßablauf gefordert werden, zu erreichen, muß das DVM HP 3458A wie folgt eingestellt werden:

- 800  $\mu$ s Integrationszeit

- 10 V Gleichspannung Meßbereich
- Automatisches Nullen deaktivieren
- Ausschalten des Anzeigedisplays

Diese Einstellungen ermöglichen dem DVM, Messungen im Meßrastraster von 1 ms durchzuführen. Wird die Steigung der Meßgröße für den Zeitraum der Integration als konstant angesehen, so kann der ermittelte Zahlenwert als Momentanwert  $P_{HP}$  nach der Zeit von 400  $\mu$ s aufgefaßt werden. Der PDI integriert die Meßwerte über die gesamte Integrationszeit von 1 ms (Startimpuls bis Stopimpuls). Als Ergebnis ergibt sich damit die Fläche unterhalb der Meßkurve, die bis zum Stopimpuls  $P_{PDI}$  durchlaufen wurde. Somit sind die beiden Meßergebnisse zwar nicht punktuell vergleichbar, besitzen jedoch immer die gleiche zeitliche Verschiebung von 600  $\mu$ s. Da die Stromwerte, die mit dem HP 3458A aufgenommen werden, allein zur Kontrolle der vom AEG-Netzgerät gelieferten Stromrampe dienen, ist es nicht notwendig, exakt punktuell vergleichbare Meßwerte zu besitzen, die mit Hilfe einer Interpolationsrechnung erstellbar wären.

- **Anzahl der Messungen**

Mit der Anzahl der Messungen wird festgelegt, wieviele Messungen mit der bereits eingegebenen Meßfrequenz ausgeführt werden. Dabei ist die wahre Anzahl der Messungen um eins geringer als die eingegebene Zahl. Diese Tatsache ist mit dem Ansteuerverhalten des PDI zu begründen, der sowohl für den Start einer Integration als auch für das Beenden der Integration einen Triggerimpuls des Puls-/Funktionsgenerators benötigt. Der Startimpuls einer Integration entspricht gleichzeitig dem Stopimpuls der vorherigen Integration. Der letzte Burstimпульs wird also zum Beenden der Integration benötigt. Somit ist die maximale Meßfolge auf 1998 Messungen begrenzt, obwohl der Puls-/Funktionsgenerator 1999 Burstimpulse liefert.

- **Spulenträger**

Die Spulenträgereingabe ist notwendig, um die Spulenmittelposition im Magneten festzulegen. Die Spulenmittelposition berechnet sich aus den in Hilfsdateien abgespeicherten Mittelpositionen und aus dem X- bzw. Y-Schwerpunkt des Spulensatzes. Um den gesamten Streubereich des magnetischen Feldes zu berücksichtigen, wird für die dynamische Magnetfeldmessung immer der Spulensatz d verwendet, da sich dessen Spule über die gesamte Spulenträgerlänge er-

streckt. Die spezifischen Daten für den Spulenträger B sowie die Daten des während der Messungen verwendeten Spulensatzes d sind dem Anhang **Tabelle 8.4** zu entnehmen.

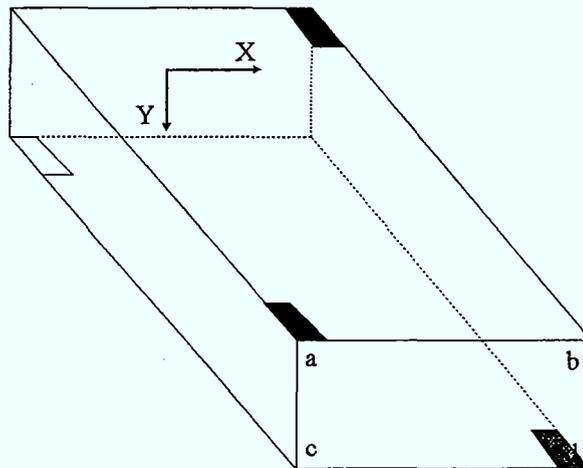
- **Spulensatz**

Die Angabe des Spulensatzes wird nur für dokumentarische Aufgaben benötigt, da in der dynamischen Magnetfeldmessung, wie oben geschildert, nur der Spulensatz d Verwendung findet.

- **Kommentar**

Der Kommentar dient der Dokumentation spezieller Eigenschaften der Meßreihe, die somit im Meßprotokoll aufgenommen werden können.

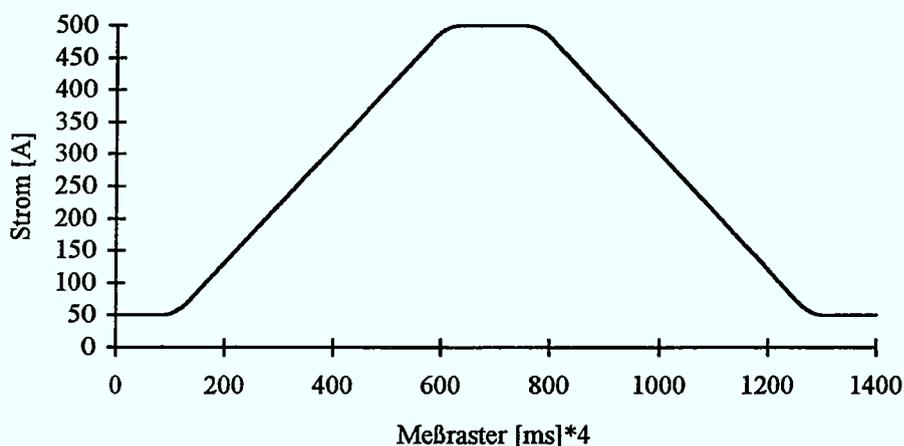
Sobald die Eingaben quittiert sind, fordert das Meßprogramm den Operator auf, den Spulenträger so auf die Tischhalterungen zu legen, daß die blaue Markierung auf dem linken Positioniertisch oben sichtbar ist. Die Spulenträger sind farbig kodiert, wie in **Abb. 4.4** zu sehen ist, um dem Operator genaue Anweisungen über die Lage des Spulenträgers geben zu können. Nach dem Bestätigen der Spulenträgerlage verfahren die Positioniertische auf die erste Meßposition. Dort wird der Operator aufgefordert, den Verstärkungsfaktor des PDI einzugeben und die Eingabe ebenfalls mit einem OK zu bestätigen.



**Abb. 4.4** Meßspulenträger mit der Festlegung der Koordinatenrichtung (X,Y), Bezeichnung der Spulensätze (a,b,c,d) und den Farbmarkierungen zur Bestimmung der Ausrichtung.

Nun kann die Stromrampe (siehe Abb. 4.5), deren Charakteristika vorher eingegeben werden müssen, von einer Workstation aus gestartet werden. Die Eingabe der Einstellungen erfolgt auf der Ellipse, einer Workstation mit dem Programm `sh_soll`. Dort wird der Bediener aufgefordert, folgende Einstellungen anzugeben:

- Flat Bottom Stromwert
- Stromsteilheit ( $dI/dt$ ) für die Aufwärtsrampe
- Flat Top Stromwert
- Stromsteilheit ( $dI/dt$ ) für die Abwärtsrampe
- Flat Bottom Stromwert



**Abb. 4.5** Stromrampe mit den Einstellungen:

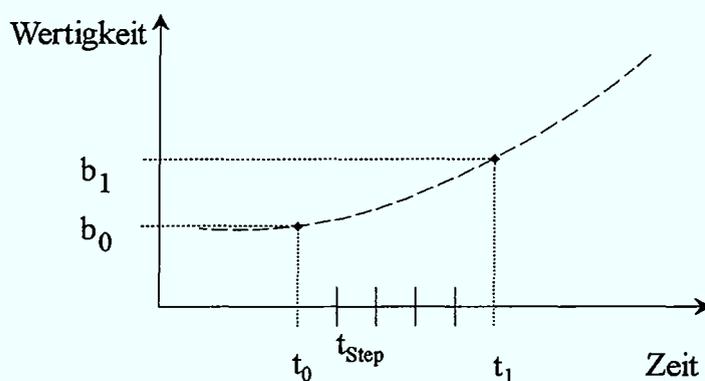
Flat Bottom Stromwert	50 A
Stromsteilheit ( $dI/dt$ ) für die Aufwärtsrampe	225 A/s
Flat Top Stromwert	500 A
Stromsteilheit ( $dI/dt$ ) für die Abwärtsrampe	-225 A/s
Flat Bottom Stromwert	50 A

Aus den gemachten Angaben werden für die einzelnen Teilbereiche Polynomkoeffizienten und Zeitabschnitte berechnet, die das eingestellte Rampenverhalten nachbilden. So wird für den Flat Bottom Bereich lediglich der Polynomkoeffizient  $a_0$  berechnet und ein Zeitabschnitt  $t_0$  eingefügt. Der Zeitabschnitt in den Flat Bereichen wird nicht berechnet, sondern in diesen Bereichen kommt es zur Einfügung einer Konstanten. Für den nachfolgenden Verrundungsbereich werden neben dem

Polynomkoeffizienten  $a_0$  noch die Koeffizienten  $a_1$ ,  $a_2$  und gegebenenfalls  $a_3$  sowie der Zeitabschnitt  $t_1$  berechnet. Da es sich bei dem anschließenden Steigungsbereich um eine lineare Steigung handelt, werden hierbei lediglich  $a_0$  und  $a_1$  sowie der Zeitabschnitt  $t_2$  berechnet. Die nachfolgenden Kurvenbereiche werden nach dem gleichen System „verschlüsselt“ und in die **dtststrom** Datei für die Stromrampe sowie die **dtstspng** Datei für die Spannungsrampe abgelegt. Diese läßt sich aus der Stromrampe und der induktiven sowie der ohmschen Last nach der Gleichung

$$u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}$$

berechnen. Soll der Zeitabschnitt eines Flat Bereiches verändert werden, so muß nach der Eingabe der Stromkurvencharakteristik der Bediener die in den **dtststrom** sowie **dtstspng** Dateien bereits abgespeicherten Zeitabschnitte mit Hilfe des Editors ändern. Diese Änderung kann jedoch nur für die Flat Bereiche vollzogen werden und muß in beiden Dateien gleich vorgenommen werden. Die rechnerisch erzeugte und aus Polynomkoeffizienten sowie Zeitabschnitten bestehende Strom- und Spannungsrampe wird nach dem Stromrampenstart über das LAN (Local Area Network) Netz zum Rechenwerk des AEG-Netzgerätes übertragen. Dort übergibt das Rechenwerk die Polynomkoeffizienten sowie die Zeitabschnitte an den Calculator (mathematischer Coprozessor), der aus den Werten Koeffizienten generiert, wie es beispielhaft in **Abb. 4.6** zu sehen ist.

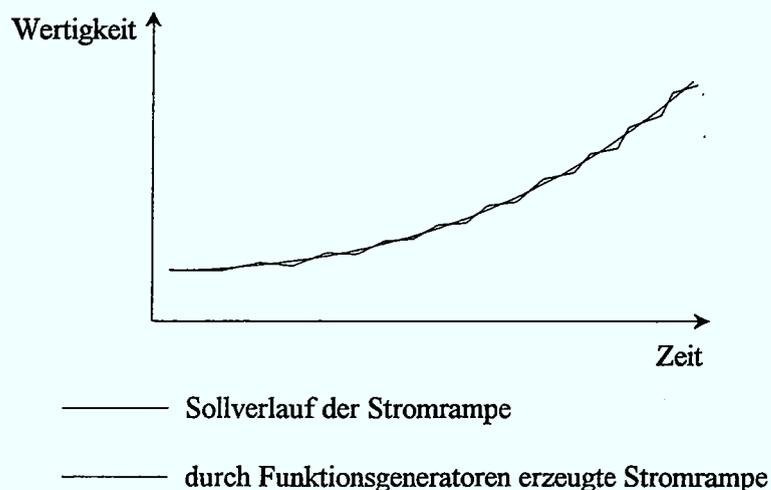


**Abb. 4.6** Koeffizientenkurvenauschnitt der aus den Polynomkoeffizienten und den Zeitabschnitten im Calculator errechnet wurde.

Die so ermittelten Koeffizienten, in **Abb. 4.6** mit  $b_0$  und  $b_1$  zur Zeit  $t_0$  und  $t_1$  bezeichnet, liegen in einem typischen Zeitraster ( $t_1-t_0$ ) von 5 ms. Unter Verwendung eines Additionsverfahrens werden die Funktionswerte im  $t_{\text{step}}$  Zeitraster, der typisch im Bereich von 100  $\mu\text{s}$  bis zu 1 ms liegt, berechnet. Die Funktionswerte werden in die Strom - bzw. Spannungs - Funktionsgeneratoren überschrieben, die mit Hilfe einer speziellen Hardwarestruktur aus den Funktionswerten Steuerkommandos bilden, die in einem jeweils 4 KByte großen FIFO (First In / First Out) Speicher geschrieben werden. Ein so erzeugtes Steuerkommando beinhaltet den Befehlssatz für die Funktionsgeneratoren, die aus den Angaben

- Schrittweite
- Zeitbasis
- Richtung der Funktion (Up/Down)
- Anzahl der Schritte

bestehen. Anhand dieser Angaben gibt der Funktionsgenerator eine Gerade mit den spezifischen Einstellungen aus, so daß sich z.B. der Sollverrundungsbereich einer Stromrampe aus vielen kleinen Geradenstücken zusammensetzt, wie es in **Abb. 4.7** schematisch dargestellt ist. Die so eingestellten Funktionsgeneratoren steuern den Leistungsteil des AEG - Netzgerätes und produzieren gleichzeitig den Triggerstartimpuls, der den Puls-/Funktionsgenerator des Meßaufbaues startet.



**Abb. 4.7** schematische Darstellung einer durch die Funktionsgeneratoren erzeugten Sollkurve der Stromrampe

Nach dem Start der Stromrampe muß diese für das LabVIEW-Programm durch den Operator bestätigt werden, um die Meßwertausgabe des HP 3458A DVM zu

starten. Die ausgelesenen Spannungswerte werden mit dem Bürdefaktor des DCCT (312,5) multipliziert, um auf den proportionalen Stromwert zu gelangen. Die so ermittelten Stromwerte werden in zwei Dateien mit dem Namen  $\alpha$ Strom.txt und  $\alpha$ Strom.xls (im Meßprogramm wird  $\alpha$  durch die fortlaufende Meßpositionsnummer innerhalb eines Meßablaufes ersetzt) abgespeichert. Die auf diesem Weg aufgenommene Stromkurve wird auf dem Bildschirm dargestellt und mit der ersten Stromkurve der laufenden Meßreihe verglichen. Desweiteren besteht die Möglichkeit, die einzelnen Stromkurven gegeneinander im 1 ms Raster zu verschieben, um zu kontrollieren, ob die Startimpulse, die vom AEG-Netzgerät geliefert werden, zu identischen Zeitpunkten erfolgt sind. Neben der graphischen Differenzstromkurve, in der die Stromdifferenzen der ersten Stromrampe und der aktuellen Stromrampe dargestellt sind, wird der Mittelwert der Differenzstromkurve berechnet und ausgegeben. Anhand dieser Informationen kann der Bediener entscheiden, ob die gefahrene Stromrampe identisch zur ersten Stromrampe ist, oder ob die aufgenommenen Meßwerte der aktuellen Messung verworfen werden und das Netzgerät eine neue Stromrampe für die momentane Meßposition produzieren muß. Die Stromrampe kann ebenfalls verworfen werden, falls der Operator den Verstärkungsfaktor des PDI falsch gewählt hat und dieses anhand der Overage-Anzeige des PDI erkennt. Entschließt sich der Operator dazu, die Stromrampe neu zu fahren, so fordert das Meßprogramm den Operator zu einer erneuten Eingabe des PDI-Verstärkungsfaktors auf und wartet anschließend auf die Bestätigung der vom Netzgerät gelieferten Stromrampe. Sobald eine Stromrampe durch den Operator akzeptiert wird, beginnt das Meßprogramm mit der Auslesung der im PDI gespeicherten Flußänderungswerte. Durch die Aufsummierung der ausgelesenen Werte können die Spulenflußwerte in zwei Dateien unter bereits beschriebenen Dateipfaden abgespeichert werden. Die Spulenflußwerte werden als Spreadsheet-Datei (XLS) abgespeichert, die für die Weiterverarbeitung in EXCEL vorgesehen ist, und als Textdatei (TXT), die für die Weiterverarbeitung in LabVIEW vorgesehen ist. Nach der Division der ausgelesenen Spulenflußwerte durch die Spulenbreite und die Spulenwindungszahl wird die entstandene Ablenkstärke ebenfalls in die bereits oben beschriebenen Datenformate abgespeichert. Gleiches gilt selbstverständlich auch für die aufgenommenen Stromrampenwerte. Sobald alle Werte abgespeichert sind, verfahren die Positioniertische die Meßspule auf die nächste Meßposition, und der Meßzyklus startet erneut. Sind alle Meßpositionen abgearbeitet worden, so ändert sich der Meßwinkel um die Winkelschrittweite, und der Bediener wird

eventuell aufgefordert, die Meßspule so zu drehen, daß die angegebene Farbmarkierung in dem linken Meßträgerhalter sichtbar wird. Daraufhin beginnt erneut der Meßablauf, wie bereits oben beschrieben, für alle Meßpositionen. Sind alle Winkelpositionen abgearbeitet worden, fahren die Positioniertische die Meßspule auf ihre Ausgangsposition zurück und das Programm wechselt in den Menüpunkt Magnetfeldmessung.

### 4.3 Auswerten der Meßwerte

Mit dem Menüpunkt **Auswerten der Meßwerte** wird dem Bediener die Option gegeben, die Stromkurven sowie die Spulenflußkurven von zwei Meßdurchläufen zu vergleichen. Nach der Auswahl des Auswertemenüs wird der Bediener aufgefordert, den Magnetnamen sowie das Datum der Meßreihen einzugeben. Aus diesen Daten werden die Dateipfade gebildet, in denen die Meßwerte abgespeichert werden. Nach dem Eingeben der Meßnummer - die Meßnummer kennzeichnet jede einzelne Meßposition innerhalb eines Meßablaufes - werden die entsprechenden Strom- bzw. Fluß-Dateien aus dem Speicher ausgelesen. Dabei werden jeweils die kompletten Meßwerte der Strom- bzw. der Spulenflußkurve und die Differenz der Kurven angezeigt. Neben der graphischen Darstellung der Differenz wird der arithmetische Mittelwert der jeweiligen Differenzkurven angezeigt. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Strom- bzw. Spulenflußkurven im Meßfrequenzraster gegeneinander zu verschieben, um so eventuelle Zeitverzögerungen einer Messung herausfiltern zu können. Desweiteren besitzt der Bediener die Möglichkeit, durch eine Änderung der Meßnummer andere Meßpositionen der beiden Meßreihen miteinander zu vergleichen.

## Kapitel 5

### Meßgenauigkeit und Fehler

In diesem Kapitel wird die Aussagefähigkeit der Meßergebnisse untersucht und die Qualität der Meßwerte beurteilt.

#### 5.1 Flußmessung mit dem PDI

Im Meßaufbau ermittelt der PDI die magnetische Flußänderung für die einzelnen Integrationsintervalle. Durch Aufsummieren der einzelnen Flußänderungen gelangt man zum magnetischen Fluß  $\Phi$ . Neben den Spezifikationen zum PDI, die bereits in **Kapitel 3.1.3.1** angegeben sind, müssen auch

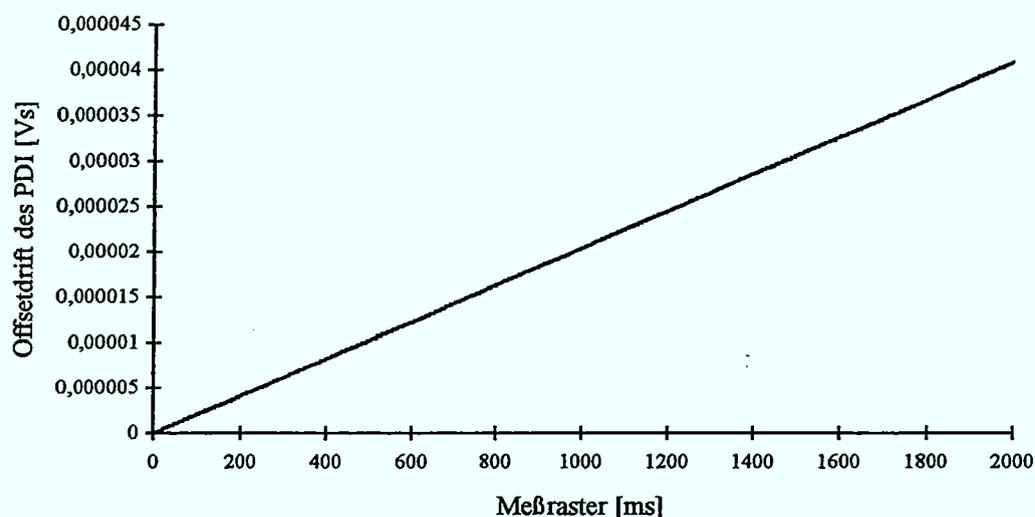
- die Temperaturabhängigkeit des PDI,
- die Zeitabhängigkeit des PDI,
- der „Offset“ des PDI und
- die Genauigkeit der Spulenträgerpositionierung

in Betracht gezogen werden, um eine Aussage über die Genauigkeit der magnetischen Flußmessung treffen zu können.

Da sich der gesamte Testaufbau in einer großräumigen, klimatisierten ( $20^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ K}$ ) Testhalle befindet, kommt es nicht zu schnellen Temperaturschwankungen. Die Temperaturabhängigkeit besitzt somit keinen Einfluß auf die Meßergebnisse des PDI.

Die Zeitabhängigkeit des PDI kann ebenfalls vernachlässigt werden, da sich der Meßzeitraum über wenige Sekunden erstreckt. Während dieses Zeitraumes (bei der Einstellung: 1998 Messungen mit einer Integrationszeit von 1 ms ergibt sich eine Meßzeit von  $< 2$  Sekunden) entsteht kein nennenswerter Einfluß auf die Meßwerte. Dahingegen kann der „Offset“, bei dem es sich um keinen herkömmlichen Offset handelt, der mit einem Offsetabgleich kompensiert werden kann, nicht vernachlässigt werden und wird näher betrachtet. Bei dem Offset handelt es sich um Differenzen und Nichtlinearitäten in der analogen und digitalen Signalverarbeitung des PDI, die vom Verstärkungsfaktor und von der Integrationsdauer abhängen. Messungen haben gezeigt, daß der Offset, der kleiner als die Auflösung des PDI ist, bei einer

Aufsummation ein nahezu lineares Verhalten besitzt. Bei den bereits angesprochenen Messungen wurde bei einer Integrationszeit von 1 ms, einem Verstärkungsfaktor von 20 und kurzgeschlossenem PDI-Eingang eine Meßserie von 1998 Messungen gestartet. Die Einstellungen sind so gewählt worden, wie sie bei der dynamischen Flußmessung vorkommen. Das bereits angedeutete lineare Verhalten der Aufsummation des Offset's ist in **Abb. 5.1** zu sehen.



**Abb. 5.1** Mittelwert eines aufintegrierten Offsetfehlers aus 10 Messungen

Wie aus der **Tabelle 5.1** hervorgeht, liegt die maximale Differenz zwischen zwei Gesamtoffsetwerten bei  $< 2 \cdot 10^{-6}$  Vs. Somit geht der Offsetfehler in die Differenzflußbestimmung, mit deren Hilfe die Einflüsse der unterschiedlichen Vakuumgefäße bestimmt wird, mit maximal  $< 2 \cdot 10^{-6}$  Vs ein, da der Differenzspulenfluß sich aus der Subtraktion zweier magnetischer Spulenflüsse zusammensetzt. Aufgrund dieser Tatsache ist es nicht notwendig, den Offsetfehler bereits während der Messung mit einer Korrekturrechnung zu kompensieren. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, daß die magnetische Flußmessung mit ihrem Flat-Top-Bereich beendet wird, um den geringsten Einfluß des Offsetfehlers sicherzustellen.

Messung	Gesamtoffset [Vs]	Abweichung vom Mittelwert
1	0,000042	$1,07 \cdot 10^{-6}$
2	0,0000413	$0,37 \cdot 10^{-6}$
3	0,0000408	$0,13 \cdot 10^{-6}$
4	0,0000403	$0,63 \cdot 10^{-6}$
5	0,0000405	$0,43 \cdot 10^{-6}$
6	0,0000403	$0,63 \cdot 10^{-6}$
7	0,0000408	$0,13 \cdot 10^{-6}$
8	0,0000408	$0,13 \cdot 10^{-6}$
9	0,000041	$0,07 \cdot 10^{-6}$
10	0,0000415	$0,57 \cdot 10^{-6}$
<b>Mittelwert des Gesamtoffset</b>		<b>0,00004093 Vs</b>

**Tabelle 5.1** Gesamtoffset der einzelnen Messungen; jede Messung wurde bei kurzgeschlossenem Eingang, einem Verstärkungsfaktor des PDI von 20, einer Integrationszeit von 1 ms und bestehend aus 1998 Einzelmessungen durchgeführt.

Da es während jeder Meßreihe zu einem Verfahren der Meßspule sowie der Entnahme des Meßspulenträgers aus der Meßspulenträgerhalterung kommt, um z.B. das Vakuumgefäß aus dem Magnetgap zu entnehmen oder verschiedene Meßpunkte innerhalb einer Meßreihe anzufahren, kann es zu einem Fehler der Spulenflußmessung kommen, der auf seine Größe zu untersuchen ist.

Dafür wird zunächst eine Meßreihe von 10 Einzelmessungen durchgeführt, bei denen der Spulenträger nach jeder Einzelmessung aus seiner Meßposition zu verfahren ist. Anschließend wird die gleiche Meßposition angefahren, wobei darauf geachtet wird, daß dieses immer aus der gleichen Richtung geschieht. Sofern diese Vorschrift eingehalten wird, besitzt die Tischpositionierung einen maximalen Positionierungsfehler von 0,01 mm [SM2000]. Im anderen Fall ist mit einem Fehler von 0,1 mm zu rechnen. Es kommt somit zu einem Spulenflußfehler, der entscheidend vom Gradienten des zu vermessenden Magneten abhängt. Der Testquadrupolmagnet besitzt einen Gradienten von 7,65 T/m und eine effektive Länge von ca. 0,57 m. Die effektive Länge ist von dem jeweiligen Stromfluß abhängig, jedoch darf für eine Abschätzung die Eisenlänge des Magneten angenommen werden. Damit ergibt sich der maximale Spulenflußfehler  $\Phi_F$  von:

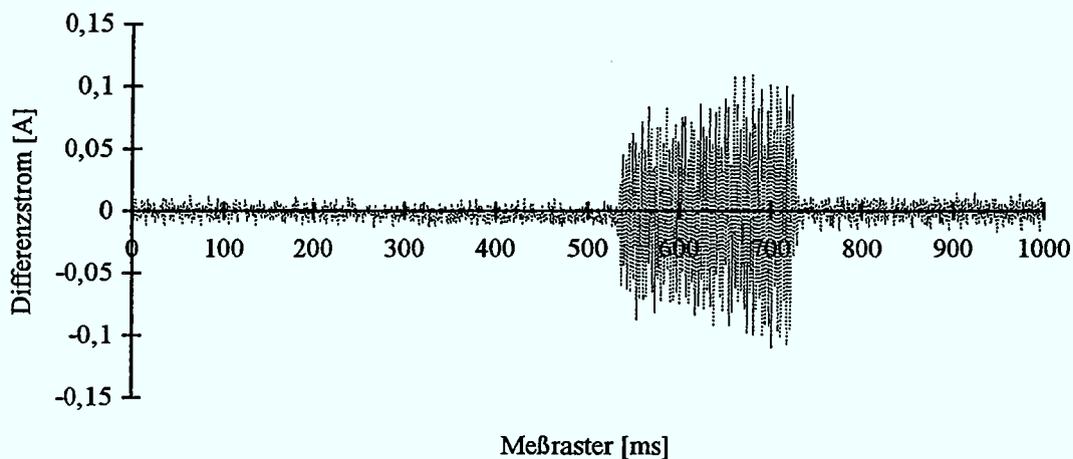
$$\Phi_F = G \cdot I_F \cdot N \cdot b \cdot l_{\text{eff}}$$

$$\Phi_F = 7,65 \text{ T/m} \cdot 0,00001 \text{ m} \cdot 100 \cdot 0,005 \text{ m} \cdot 0,57 \text{ m}$$

$$\Phi_F = 2,18 \cdot 10^{-5} \text{ Vs}$$

Hierbei entspricht: G Gradient  
 $I_F$  Positionierungsfehler des Spulenträgers  
 N Spulenwindungszahl  
 b Spulenbreite  
 $l_{\text{eff}}$  effektive Magnetlänge

Dieser berechnete maximale Spulenflußfehler bestätigt sich auch nach der Auswertung der Meßreihe von 10 Messungen. Für die Auswertung werden die Spulenflußmeßwerte, die im Verrundungsbereiche der Stromrampe liegen (in der **Abb. 5.2** im Bereich von 530 ms bis 730 ms) nicht berücksichtigt. Da, wie aus der Differenzstrombetrachtung (**Abb. 5.2**) ersichtlich, die Verrundungsbereiche der Stromrampe nicht reproduzierbar genug vom Netzgerät geliefert werden.



**Abb. 5.2** Differenzstromkurve zweier Stromrampen mit den Einstellwerten 50 A auf 300 A bei einem  $dI/dt = 600 \text{ A/s}$  und den Verrundungsbereichen von 530 ms bis 730 ms

Es stellt sich heraus, daß die maximale Abweichung zwischen zwei Messungen  $< 2 \cdot 10^{-5} \text{ Vs}$  beträgt und somit der Tischpositionierungsfehler im erwarteten Bereich liegt.

Den Fehlereinfluß bei der Herausnahme des Spulenträgers aus der Spulenträgerhalterung auf die dynamische Spulenflußmessung wird ebenfalls durch eine Meßreihe von 10 Einzelmessungen ermittelt. Dabei wird nach jeder Messung der Spulenträger aus der Halterung gehoben, um anschließend wieder auf der gleichen Position abgelegt zu werden. Hierbei stellt sich heraus, daß der maximale Fehler zweier Einzelmessungen im Bereich  $< 4 \cdot 10^{-5}$  Vs liegt, auch hierbei werden die Verrundungsbereiche der Stromrampe ausgespart. Demnach besitzt der Meßspulenträger eine Ungenauigkeit von  $< 0,02$  mm, so daß der Gesamtfehler der Spulenpositionierung  $< 0,03$  mm beträgt. Da es sich in beiden Fällen um einen Gradientenfehler handelt, der proportional zur Stromrampe ist, läßt sich der Gesamtfehler für die Differenzbetrachtung zweier Stromrampen mit unterschiedlichen Vakuumgefäßen später korrigieren.

## 5.2 Rampenstrommessung mit dem DCCT

Der DCCT 861 R von Danfysik [DANF], der in Verbindung mit dem HP 3458A DVM zur Messung der Stromrampe eingesetzt wird, besitzt folgende Spezifikationen:

- Temperaturstabilität  $< 1$  ppm/°C
- Zeitstabilität  $< 5$  ppm/month
- Linearität  $< 5$  ppm
- Ausgangsrauschen  $< 3$  ppm (DC - 10 kHz)

Die gemachten Angaben beziehen sich auf den im Meßablauf benutzten Meßbereichsendwert von 3125 A.

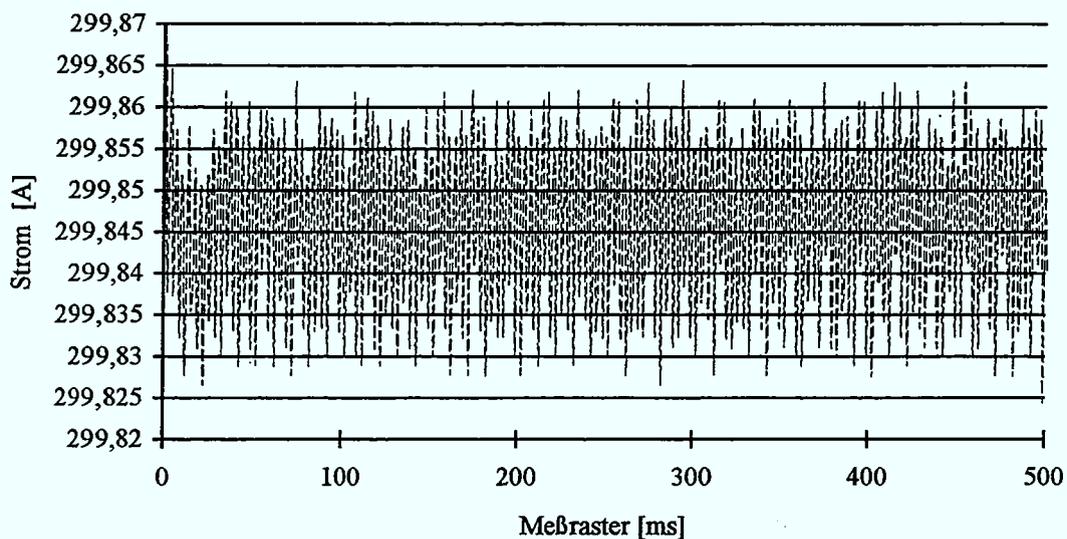
Das HP 3458A DVM dagegen besitzt die bereits in **Kapitel 3.1.3.2** aufgeführten Kenndaten:

- maximale Abweichung 100 nV
- Zeitstabilität für 24 Stunden  $0,5 + 0,05$  (ppm des Meßwertes + ppm des Meßbereiches)
- Temperatur Koeffizient/°C  $0,5 + 0,01$  (ppm des Meßwertes + ppm des Meßbereiches)

Die angegebenen Kenndaten gelten für den im Meßablauf benutzten 10 V DC Meßbereich.

Wie auch schon bei dem PDI können für den DCCT und das HP 3458A DVM der temperaturabhängige sowie der zeitstabhängige Fehler der Meßgeräte vernachlässigt werden, da die Meßgeräte unter den gleichen Bedingungen, wie zuvor in Kapitel 5.1 für das PDI beschrieben, arbeiten.

Eine Untersuchung der Linearität beider Meßgeräte hat ergeben, daß kein Linearitätsfehler über eine Meßreihe von 500 Messungen erkennbar ist, wobei der in Abb. 5.3 dargestellte Kurvenverlauf entstanden ist.



**Abb. 5.3** Stromkurve bei einem konstanten Stromwert

Die Abb. 5.3 zeigt, daß das Rauschband eine Bandbreite von 36 mA besitzt. Der daraus errechenbare Rauschpegel für beide Meßgeräte, bei einer Integrationszeit von 800  $\mu$ s, würde bei  $< 6$  ppm liegen bezogen auf den Nennstrom des DCCT von 3125 Ampere. Daraus ist ersichtlich, daß die Meßgeräte bereits im Rauschbereich des AEG-Netzgerätes arbeiten.

### 5.3 Impulserzeugung mit dem HP 8161A Puls-/Funktionsgenerator

Die Genauigkeit des HP 8161A Puls-/Funktionsgenerators war bereits Bestandteil der Diplomarbeit von Volker Stobik [Stob93], worauf in diesem Zusammenhang verwiesen wird. Aus dieser Arbeit geht hervor, daß die Meßzeiten für jedes Meßraster auf  $< 1$   $\mu$ s genau festgelegt sind.

## Kapitel 6

### Meßergebnisse

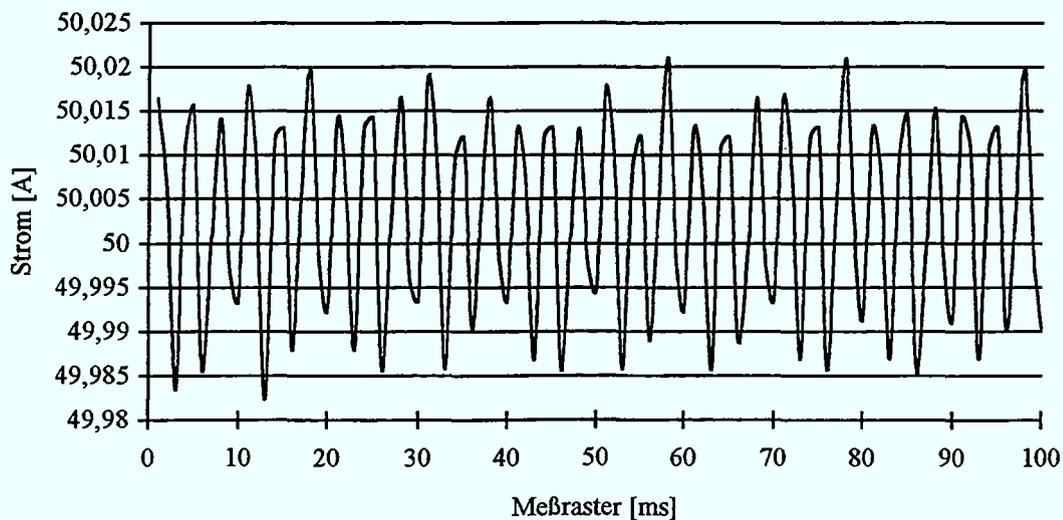
In diesem Kapitel werden die Meßreihen ausgewertet und die aufgetretenen Phänomene erläutert.

#### 6.1 Vorbemerkung zu den Meßreihen

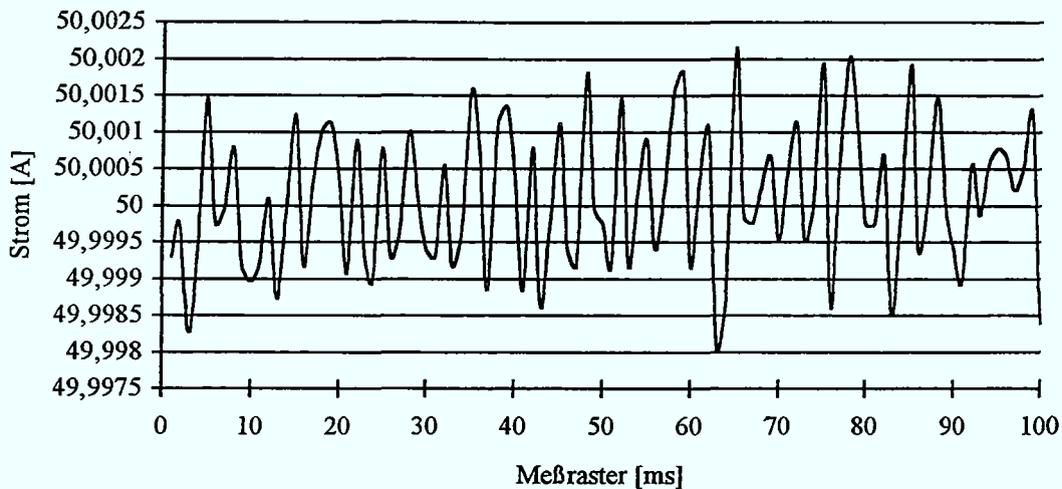
Im folgenden wird festgelegt, daß sich eine Messung immer aus dem Mittelwert von 10 Einzelmessungen zusammensetzt. Dadurch läßt sich der Rauschbereich des Stromes, der bei einer Einzelmessung mit den Einstellungen

- $I_{\text{Start}} = 50 \text{ A}$
- $dI/dt = 600 \text{ A/s}$
- $I_{\text{Top}} = 300 \text{ A}$
- Meßwinkel  $0^\circ$
- Meßraaster 50 mm
- Meßfrequenz 1000 Hz
- Meßanzahl 1000 Messungen je Einzelmessung

im Bereich von  $< \pm 18 \text{ mA}$  liegt, auf einen Wert von  $< \pm 4 \text{ mA}$  verringern, wie aus den **Abbildungen 6.1** und **6.2** ersichtlich ist.



**Abb. 6.1** Einzelstromkurve mit einem Rauschbereich von  $< \pm 18 \text{ mA}$



**Abb. 6.2** Stromkurve, aufgenommen anhand der Mittelwerte aus 10 Einzelmessungen mit einem Rauschbereich von  $< \pm 4$  mA

Dabei ist eine Mittelwertbildung aus 10 Einzelmessungen aus folgenden Gründen zulässig:

1. Die magnetische Last ist in allen Messungen gleich, da bei jeder Messung die gleiche Hysteresisschleife abgefahren wird. Somit besitzt der Magnet bei jeder Messung die gleiche magnetische Vorgeschichte.
2. Die ohmsche Last des Magneten ist immer gleich, da es wegen der Wasserkühlung und der damit verbundenen guten Wärmeableitung zu keiner nennenswerten Erwärmung der Magnetspulen kommt, die einen Einfluß auf die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers nehmen könnte.
3. Da der Funktionsgenerator immer zur gleichen Zeit seinen Startimpuls von dem Netzgerät erhält, der diese an die Meßgeräte weitergibt. Dieses läßt sich anhand der Differenzbildung zweier Stromrampen belegen (**Abb. 6.3**). Zum Vergleich ist in **Abb. 6.4** eine Differenzbildung zweier Stromrampen dargestellt, bei dem der vom Netzgerät gelieferte Startimpuls für den Funktionsgenerator einen Zeitverzug von  $100 \mu\text{s}$  besitzt.

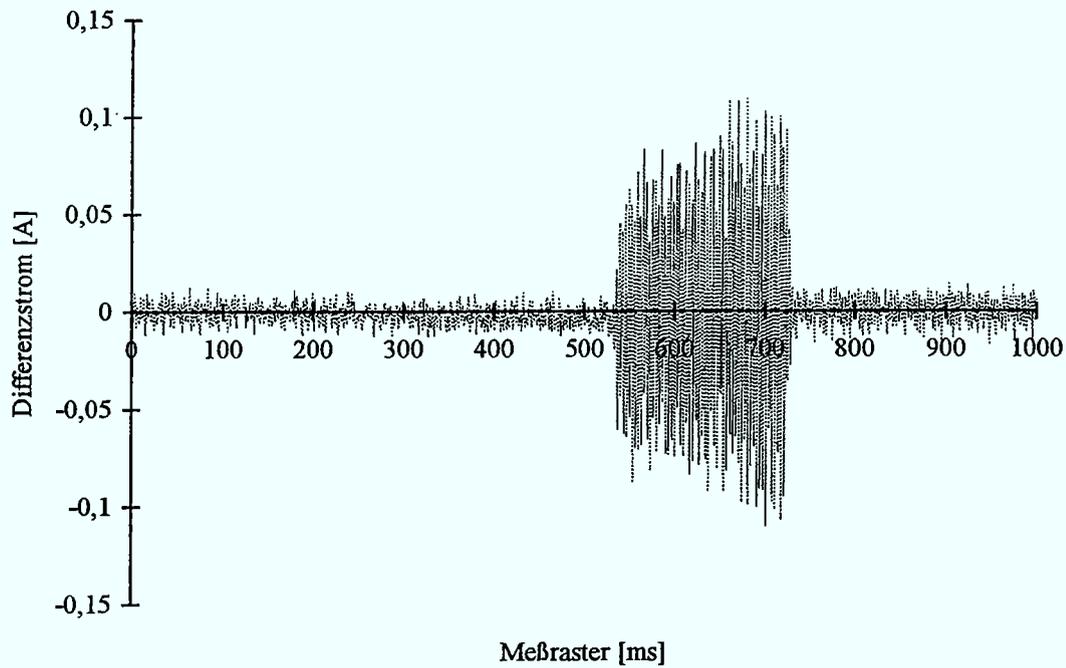


Abb. 6.3 Differenzstromrampe zweier Stromrampen

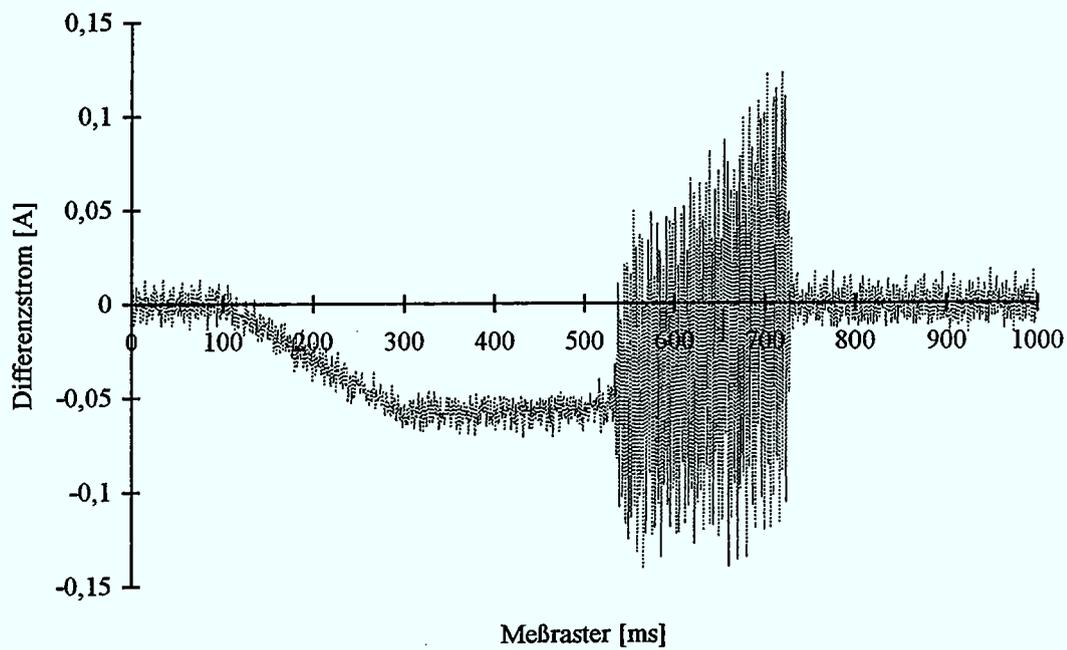
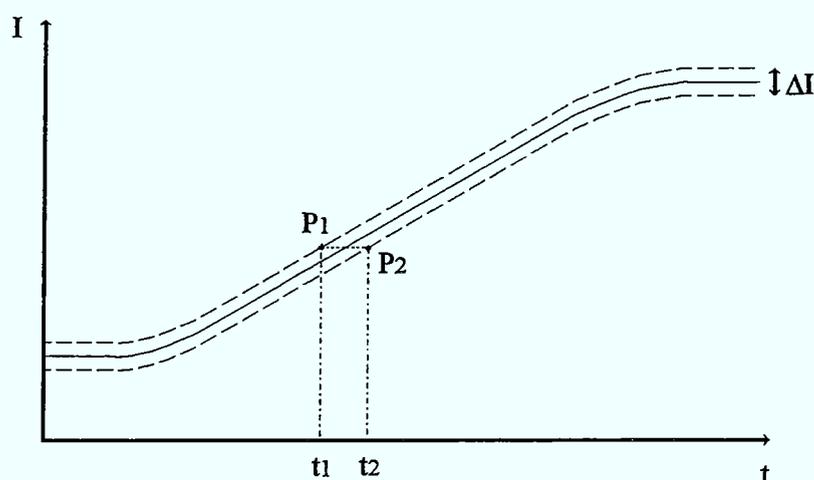


Abb. 6.4 Differenzstromrampe zweier Stromrampen, bei dem eine Stromrampe rechnerisch um 100  $\mu$ s verzögert wurde.

Bevor es zu einer Mittelwertbildung kommt, werden die aufgenommenen Stromrampen mit Hilfe der Differenzbildung miteinander verglichen, um sicherzustellen, daß keine direkt erkennbare Zeitverzögerung einer Stromrampe vorliegt. Dabei lassen sich jedoch die Zeitverzögerungen zweier Stromrampen, aufgrund des Rauschbandes von  $< \pm 18 \text{ mA}$ , nur bis auf einen Wert von  $60 \text{ } \mu\text{s}$  genau bestimmen (siehe dazu **Abb. 6.5**).



**Abb. 6.5** schematische Darstellung des Rauschbandes

Wird zum Zeitpunkt  $t_1$  ein Stromwert aufgenommen, so könnte dieser Stromwert an der oberen Grenze  $P_1$  des Rauschbandes (in der Abbildung gestrichelt gezeichnet) liegen. Dieser Wert entspricht allerdings auch dem Stromwert an der unteren Grenze des Rauschbandes  $P_2$ , der zum Zeitpunkt  $t_2$  anliegt. So ist es beim Vergleich zweier Stromrampen (innerhalb des Bereiches der konstanten Steigung) möglich, daß die Differenzkurve dieser Stromrampen eine Nullkurve ergibt, die Stromrampen aber dennoch eine Zeitverschiebung  $T$  von  $60 \text{ } \mu\text{s}$  gegeneinander besitzen. Dabei entsprechen  $60 \text{ } \mu\text{s}$  einem Zeitfehler von  $6\%$ , sofern in einem Meßrafter von  $1 \text{ ms}$  gemessen wird. Für den Vergleich zweier Stromrampen wird der Bereich der konstanten Steigung ausgewählt, da es hier zu der genauesten Ermittlung der Zeitverschiebung kommt.

$$T = \frac{\Delta I}{dI/dt}$$

$$T = \frac{0,036 \text{ A}}{600 \text{ A/s}} = 60 \text{ } \mu\text{s}$$

Wie bereits in **Abb. 6.2** dargestellt, besitzt die aus den Mittelwerten von 10 Einzelmessungen bestehende Stromkurve einen Rauschbereich von  $< \pm 4 \text{ mA}$ , womit sich die Zeitverschiebung zweier Mittelwertstromkurven bis auf  $13 \text{ } \mu\text{s}$  genau bestimmen läßt. Das gleiche gilt selbstverständlich auch für die Spulenflußkurve, die proportional zur Stromkurve verläuft. Bei der Spulenflußkurve läßt sich, mit Hilfe der Mittelwertbildung, der Rauschbereich von  $< \pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ Vs}$  bei einer Einzelmessung, auf einen Bereich von  $< \pm 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ Vs}$  bei einer Mittelwertkurve senken, was ebenfalls eine Ermittlung der Zeitverschiebung bis auf  $13 \text{ } \mu\text{s}$  zuläßt.

Desweiteren wird festgelegt, daß die Spulenflußmessung, die im Magnetgap ohne Vakuumgefäß erfolgt, als **Original**-Messung tituiert wird, während die anderen Messungen jeweils mit dem Beisatz behaftet werden, innerhalb welchen Vakuumgefäßes die Messungen erfolgten.

## 6.2 Flußmessungen innerhalb eines Stahlrohres

In diesem Abschnitt wird der Originalspulenfluß mit dem Spulenfluß innerhalb eines Stahlrohres (COSY-Vakuumgefäß) verglichen, um den Einfluß auf den Magnetfeldaufbau zu untersuchen.

Bei beiden Messungen wurden die Einstellungen

- $I_{\text{Start}} = 50 \text{ A}$
- $dI/dt = 600 \text{ A/s}$
- $I_{\text{Top}} = 300 \text{ A}$
- Meßwinkel  $0^\circ$
- Meßrastraster  $50 \text{ mm}$
- Meßfrequenz  $1000 \text{ Hz}$
- Meßanzahl  $1000$  Messungen je Einzelmessung

gewählt, so daß sich folgende in den **Abbildungen 6.6** und **6.7** zu sehende Spulenflußverläufe ergeben.

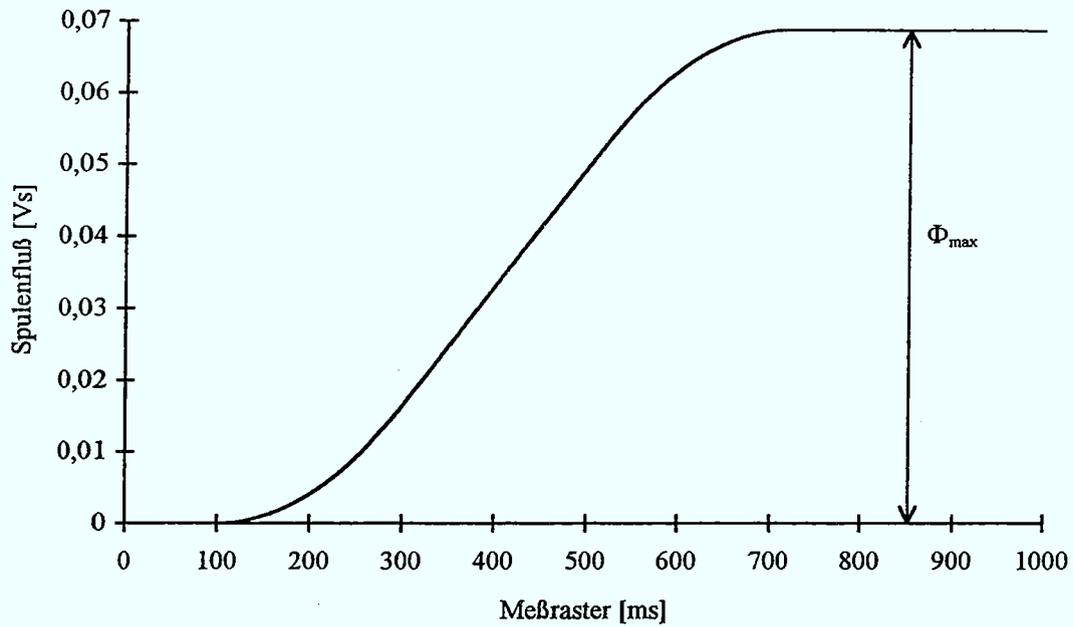


Abb. 6.6 Spulenflußverlauf innerhalb vom Magnetgap mit  $\Phi_{\max}$  = maximaler Spulenfluß

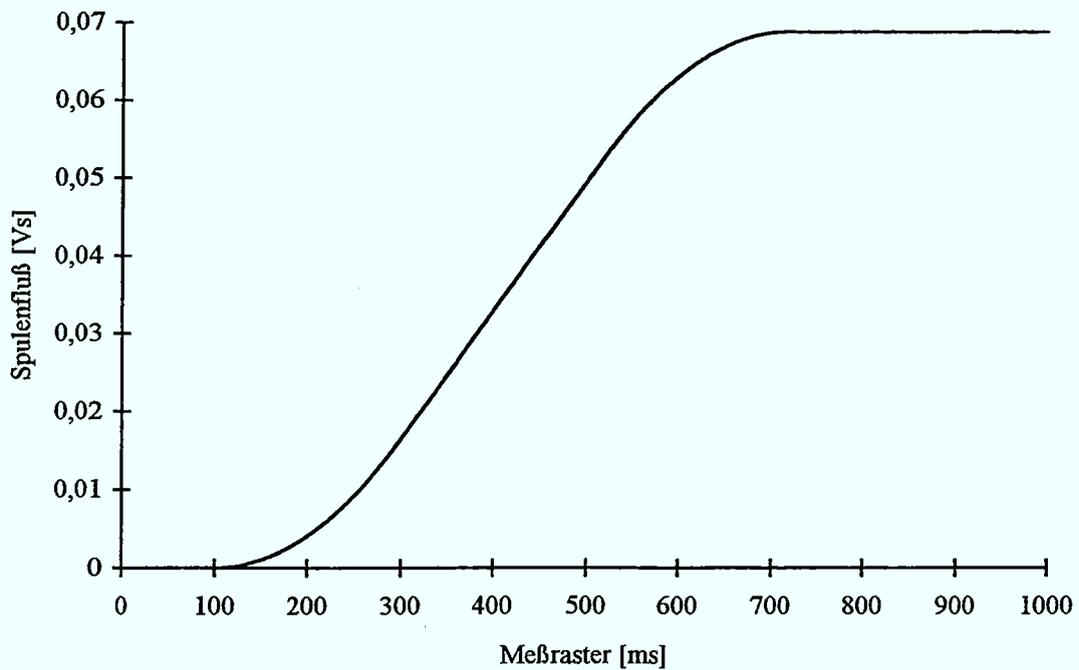
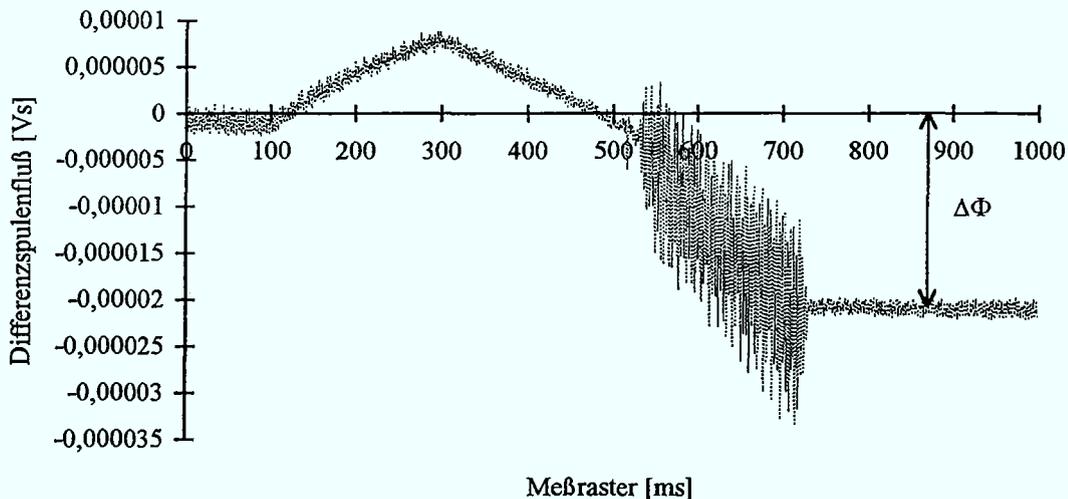


Abb. 6.7 Spulenflußverlauf innerhalb eines Stahlrohres im Magnetgap

Wird der innerhalb des Stahlrohres gemessene Spulenfluß vom Originalspulenfluß subtrahiert, so entsteht der in **Abb. 6.8** dargestellte Differenzflußverlauf.



**Abb. 6.8** Differenzspulenfluß (Ohne Stahlrohr - Mit Stahlrohr) mit  $\Delta\Phi =$  maximaler Korrekturfluß

Hierbei ist zu erkennen, daß der Kurvenverlauf noch einen Positionierungsfehler enthält, der bereits in **Kapitel 5.1** erklärt wurde. Dieser Fehler läßt sich mit einer Korrekturrechnung beheben, in welcher der Differenzfluß um einen Korrekturfluß (**Abb. 6.9**) erhöht wird. Der Korrekturfluß errechnet sich aus dem um einen Faktor  $s$  verkleinerten Originalspulenfluß. Der Faktor  $s$  besteht aus der Division des in **Abb. 6.6** dargestellten Flat-Top-Spulenflusses  $\Phi_{\max}$  durch den in **Abb. 6.8** eingezeichneten  $\Delta\Phi$ , der Abweichung des Differenzflusses von der 0-Achse im Flat-Top-Bereich (730 ms - 1000 ms):

$$s = \frac{\Phi_{\max}}{\Delta\Phi}$$

$s =$  Korrekturfaktor

Für die gegebene Messung ergibt sich mit den Werten

$$\Phi_{\max} = 0,068775 \text{ Vs}$$

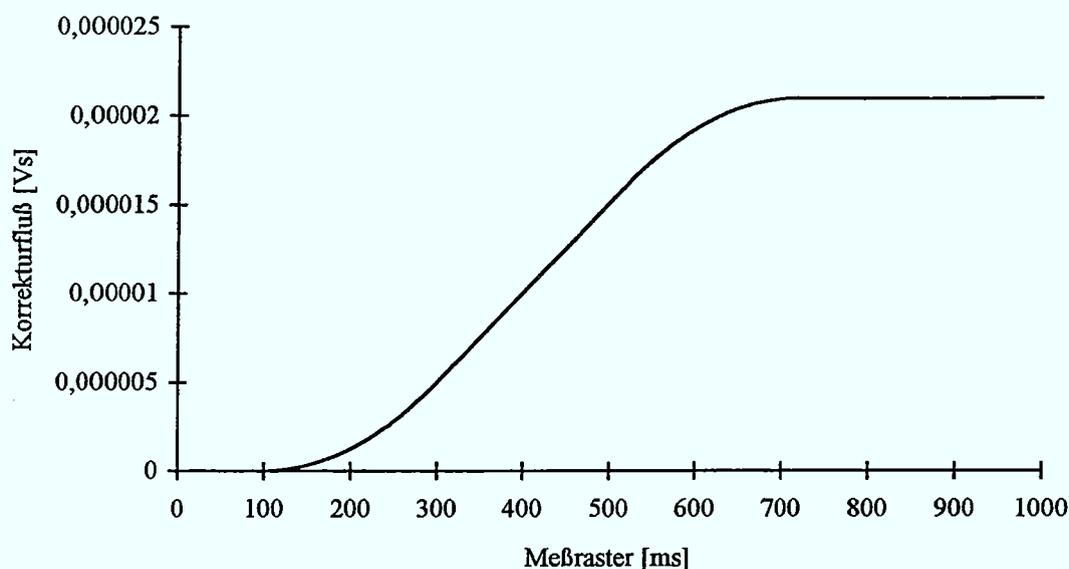
$$\Delta\Phi = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ Vs}$$

ein Korrekturfaktor  $s$  von 3275.

Daraus läßt sich mit der Gleichung

$$\Phi_{\text{Korr}} = \frac{\Phi_{\text{Orig}}}{s}$$

und dem Originalspulenfluß  $\Phi_{\text{Orig}}$  der in **Abb. 6.9** dargestellte Korrekturfluß  $\Phi_{\text{Korr}}$  errechnen.

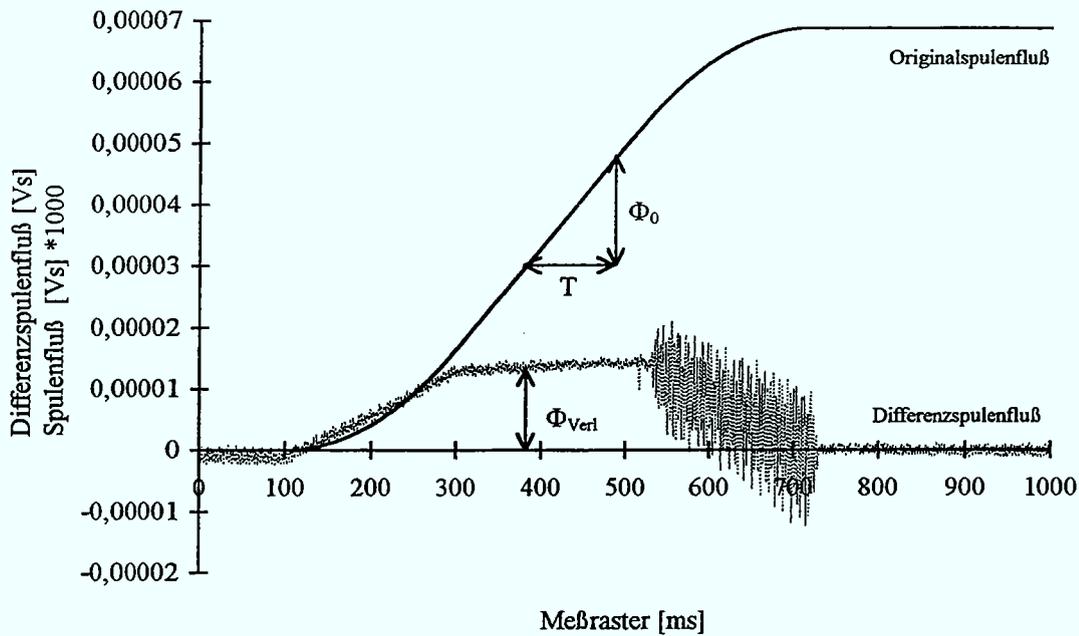


**Abb. 6.9** Korrekturflußverlauf

Nach der Korrektur des Differenzflusses stellt sich das in **Abb. 6.10** gezeichnete Kurvendiagramm dar, in dem ebenfalls der um den Faktor 1000 verkleinerte Originalspulenfluß beinhaltet ist.

Der Differenzspulenfluß entspricht dem Wirbelstromfeld, das innerhalb des Stahlgefäßes aufgebaut wird und, wie bereits in **Kapitel 2.1.8** beschrieben, dem Originalfeld entgegengerichtet ist. Es ist anhand der **Abb 6.10** ersichtlich, daß sich innerhalb des ersten Verrundungsbereiches (100 bis 300 ms) ein größer werdendes Wirbelstromfeld aufbaut, das aufgrund des sich ändernden magnetischen Feldverlaufes entsteht. Im Verlauf der konstanten Stromsteigung (300 bis 530 ms) und somit auch der konstanten magnetischen Feldsteigung kommt es zu keiner Zunahme der Wirbelströme. Innerhalb dieses Bereiches (300 bis 530 ms) kommt die Abhängigkeit der Wirbelströme von der Geschwindigkeit des sich ändernden magnetischen Feldes zum Tragen. Es kommt zu einem zeitverzögerten Aufbau des magne-

tischen Feldes innerhalb des Stahlrohres. Diese Eigenschaft des Stahlrohres läßt sich durch die Definition einer Zeitkonstante  $\tau$  beschreiben.



**Abb. 6.10** Differenzspulenfluß und der um den Faktor 1000 verkleinerte Originalspulenfluß

Die Zeitkonstante kann für den Bereich der konstanten Spulenflußsteigung wie folgt ausgerechnet werden:

$$\tau = \frac{\Phi_{Verl}}{\frac{\Phi_0}{T}}$$

$\Phi_{Verl}$  Spulenflußdifferenz im Bereich der konstanten Spulenflußsteigung

$\Phi_0/T$  Steigung, mit der der Spulenfluß im Bereich von 300 bis 530 ms wächst

(Abb. 6.10)

Für die vorliegende Messung ergibt sich bei  $\Phi_0/T = 16,52 \cdot 10^{-5}$  Vs/ms und einem  $\Phi_{Verl} = 1,29 \cdot 10^{-5}$  Vs eine Zeitkonstante  $\tau_{St} = 78 \mu s$ .

**Herleitung der Formel:**

Da es sich im vorliegenden Fall um ein regeltechnisches  $PT_1$  Verhalten des Vakuumgefäßes handelt, das einen Proportionalitätsfaktor von 1 besitzt, kann die folgende Gleichung aufgestellt werden:

Hierbei gilt:  $\Phi_e$  Eingangsspulenfluß (Originalspulenfluß)

$\Phi_a$  Ausgangsspulenfluß (Spulenfluß innerhalb eines Vakuumrohres)

$\Phi_{\text{Verl}}$  Verlustspulenfluß aufgrund von Wirbelströmen

$\tau$  Zeitkonstante

$$\Phi_e(t) = \dot{\Phi}_a(t) * \tau + \Phi_a(t)$$

$$\Phi_e(t) = \Phi_a(t) * j\omega * \tau + \Phi_a(t)$$

$$\Phi_e(t) = \frac{\Phi_0}{T} * t \quad \Phi_e(s) = \frac{\Phi_0}{T} * \frac{1}{s^2}$$

$$\Phi_e(s) = \Phi_a(s) * s * \tau + \Phi_a(s)$$

$$\frac{\Phi_0}{T} * \frac{1}{s^2} = \Phi_a(s) * (s * \tau + 1)$$

$$\Phi_a(s) = \frac{\Phi_0}{T * \tau} * \frac{1}{s^2 * \left(s + \frac{1}{\tau}\right)}$$

$$\frac{1}{(s + \alpha) * (s + \beta)^2} \quad \circ \bullet \quad \frac{1}{(\beta - \alpha)^2} * (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} - (\beta - \alpha) * t * e^{-\beta t})$$

$$\Phi_a(t) = \frac{\Phi_0}{T * \tau} * \left[ \tau^2 * \left( e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 + \frac{t}{\tau} \right) \right]$$

$$\Phi_a(t) = \frac{\Phi_0 * t}{T} - \frac{\Phi_0 * \tau}{T} + \frac{\Phi_0 * \tau}{T} * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\Phi_a(t) = \Phi_0 * \left[ \frac{t}{T} - \frac{\tau}{T} * \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]$$

$$\Phi_{\text{Verl}} = \Phi_e(t) - \Phi_a(t)$$

$$\Phi_{\text{verl}} = \Phi_0 * \frac{t}{T} - \Phi_0 * \frac{t}{T} + \Phi_0 * \frac{\tau}{T} - \Phi_0 * \frac{\tau}{T} * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Für den eingeschwungenen Zustand ( $t \rightarrow \infty$ ) gilt:

$$\Phi_{\text{verl}} = \Phi_0 * \frac{\tau}{T}$$

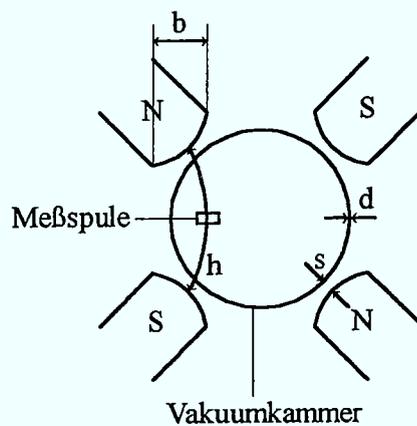
$$\tau = \frac{\Phi_{\text{verl}}}{\frac{\Phi_0}{T}}$$

### Kontrolle der ermittelten Meßwerte:

Unter Berücksichtigung der in **Abb. 6.11** gegebenen Versuchsanordnung, die für die Durchführung der Meßreihe verwendet wurde, läßt sich mit Hilfe der Faustformel

$$\Phi_{\text{verl}} = \dot{\Phi} * \frac{\mu_0 * b^2 * d * \chi}{4 * h}$$

das gemessene Ergebnis für die Spulenflußdifferenz  $\Phi_{\text{verl}}$  kontrollieren.



**Abb. 6.11** Skizze der Versuchsanordnung

Hierbei entspricht:  $\dot{\Phi}$  der Spulenflußsteigung  
 h dem Abstand der beiden Magnetpole  
 b der Breite der Magnetpole

- d der Rohrwandungsdicke des Vakuumgefäßes
- $\mu_0$  der Permeabilitätskonstanten
- $\chi$  der elektrischen Leitfähigkeit des Vakuumgefäßes
- s dem Abstand zwischen Magnetpol und Vakuumkammer

Die Spulenflußsteigung  $\dot{\Phi}$  läßt sich für eine Stromsteigung von 600 A/s wie folgt ermitteln:

Der Magnet, der bei einem Nennstrom  $I_{\text{Nenn}}$  von 522 A ein magnetisches Feld  $B_{\text{Nenn}}$  von 0,65 T am Polschuh erzeugt, besitzt einen Gradienten  $G$  von 7,65 T/m. Da das Vakuumgefäß jeweils 10 mm vom Polschuh entfernt liegt ( $s$ ), sich also ein gesamter Luftspalt von 20 mm zwischen zwei Polschuhen ergibt, besteht am Vakuumgefäß nur noch ein magnetisches Feld  $B_{\text{res}}$  von:

$$B_{\text{res}} = B_{\text{Nenn}} - 2 * s * G = 0,65 \text{ T} - 0,02 \text{ m} * 7,65 \text{ T/m} = 0,497 \text{ T}$$

Somit läßt sich für die Stromsteigung ( $dI/dt$ ) von 600 A/s an der Vakuumkammer eine Steigung der magnetischen Induktion  $\dot{B}$  von

$$\dot{B} = B_{\text{res}} * \frac{dI/dt}{I_{\text{Nenn}}} = 0,571 \text{ T/s}$$

errechnen.

Daraus kann unter Verwendung der Spulenkenndaten

b = Spulenbreit

n = Windungszahl

$l_{\text{eff}}$  = effektive Magnetlänge

eine Spulenflußsteigung  $\dot{\Phi}$  errechnet werden.

$$\dot{\Phi} = \dot{B} * b * n * l_{\text{eff}} = 0,571 \text{ T/s} * 0,005 \text{ m} * 100 * 0,6 \text{ m} = 17,13 * 10^{-5} \frac{\text{Vs}}{\text{ms}}$$

Zum Vergleich dazu, gemessen wurden  $16,52 * 10^{-5}$  Vs/ms, allerdings wurden auch hier nur Näherungswerte verwendet, so daß dieses Ergebnis lediglich die Tendenz der Spulenflußsteigung andeutet.

Nun kann mit Hilfe der bereits angegebenen Faustformel der Wirbelstromfluß errechnet werden.

$$\Phi_{\text{verl}} = 0,1713 \frac{\text{Vs}}{\text{s}} * \frac{4 * \pi * 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} * 110^2 \text{ mm}^2 * 2 \text{ mm} * 1,3 \frac{\text{m}}{\Omega * \text{mm}^2}}{4 * 150 \text{ mm}}$$

$$\Phi_{\text{verl}} = 1,158 * 10^{-5} \text{ Vs}$$

Zum Vergleich dazu, im Meßaufbau wurde ein Wirbelstromfluß  $\Phi_{\text{verl}}$  ermittelt, der mit  $1,29 * 10^{-5}$  Vs um 11% größer ist als der Errechnete. Jedoch muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die eingesetzte Faustformel nur einen Anhaltspunkt geben soll, mit welchen Größen bei der Messung gerechnet werden muß.

### 6.3 Flußmessungen innerhalb eines Kupferrohres

In diesem Abschnitt wird der Originalspulenfluß mit dem Spulenfluß innerhalb eines Kupferrohres verglichen, um ebenfalls den Einfluß auf den Magnetfeldaufbau zu untersuchen.

Bei beiden Messungen wurden die Einstellungen gewählt, wie sie bereits in Kapitel 6.2 verwendet wurden. Daraus ergeben sich die in den Abbildungen 6.6 und 6.12 dargestellten Spulenflußverläufe.

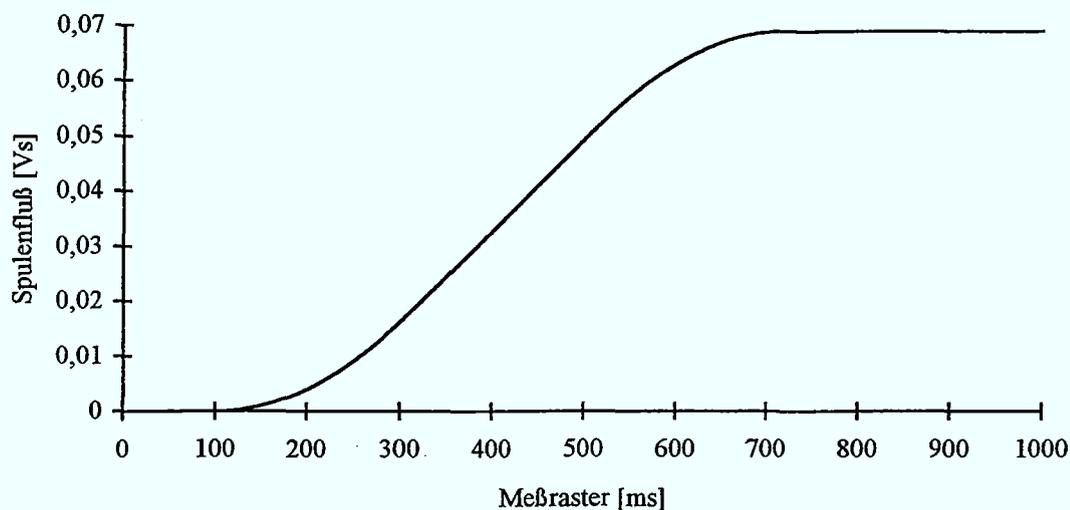
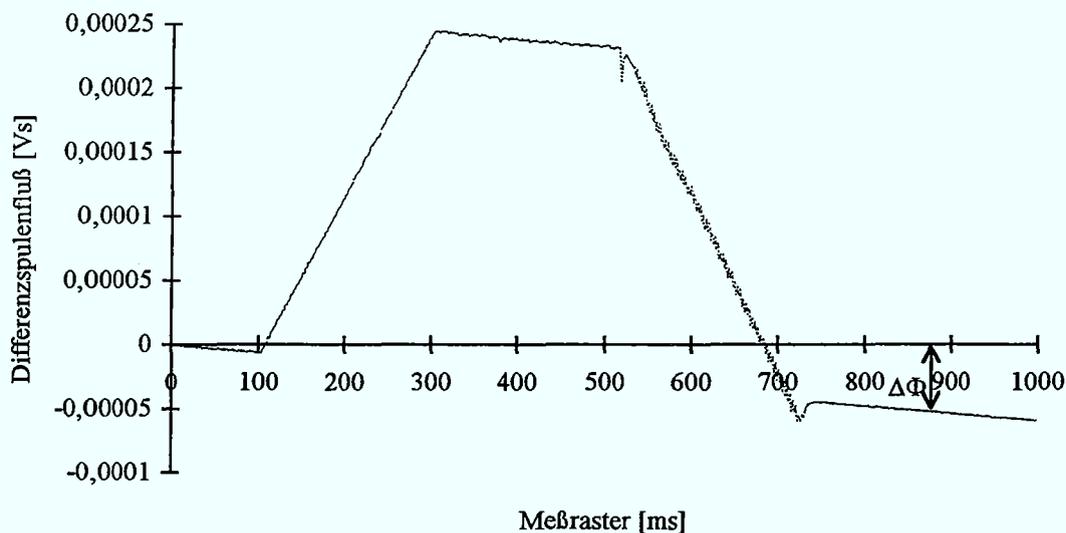


Abb. 6.12 Spulenflußverlauf innerhalb eines Kupferrohres im Magnetgap

Wird der innerhalb des Kupferrohres gemessene Spulenfluß vom Originalspulenfluß subtrahiert, so entsteht der in **Abb. 6.13** dargestellte Differenzflußverlauf.



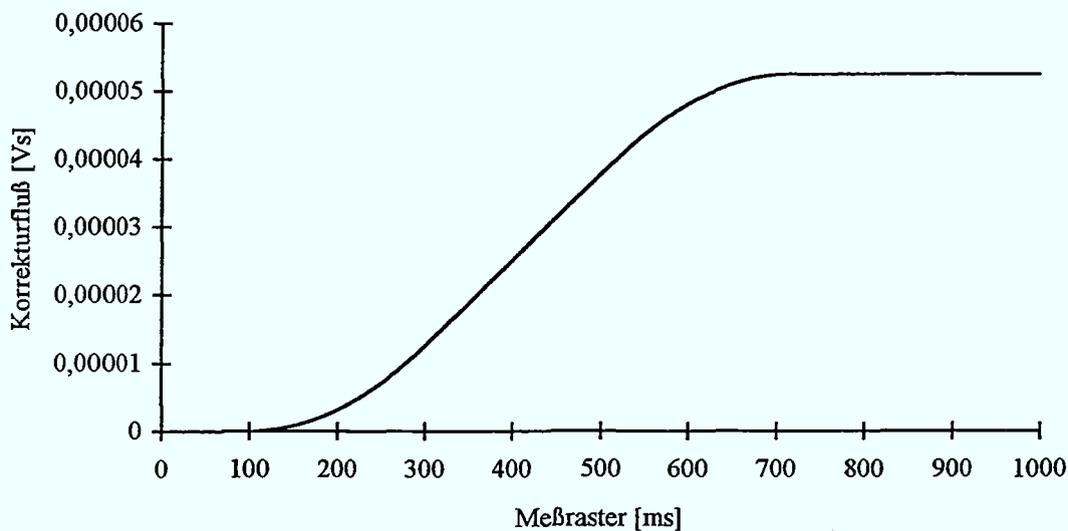
**Abb. 6.13** Differenzspulenfluß (Ohne Kupferrohr - Mit Kupferrohr)

Für die gegebene Messung ergibt sich mit den Werten

$$\Phi_{\max} = 0,068775 \text{ Vs}$$

$$\Delta\Phi = 5,25 \cdot 10^{-5} \text{ Vs}$$

ein  $s$  von 1310 und daraus der in **Abb. 6.14** errechnete Korrekturfluß



**Abb. 6.14** Korrekturflußverlauf

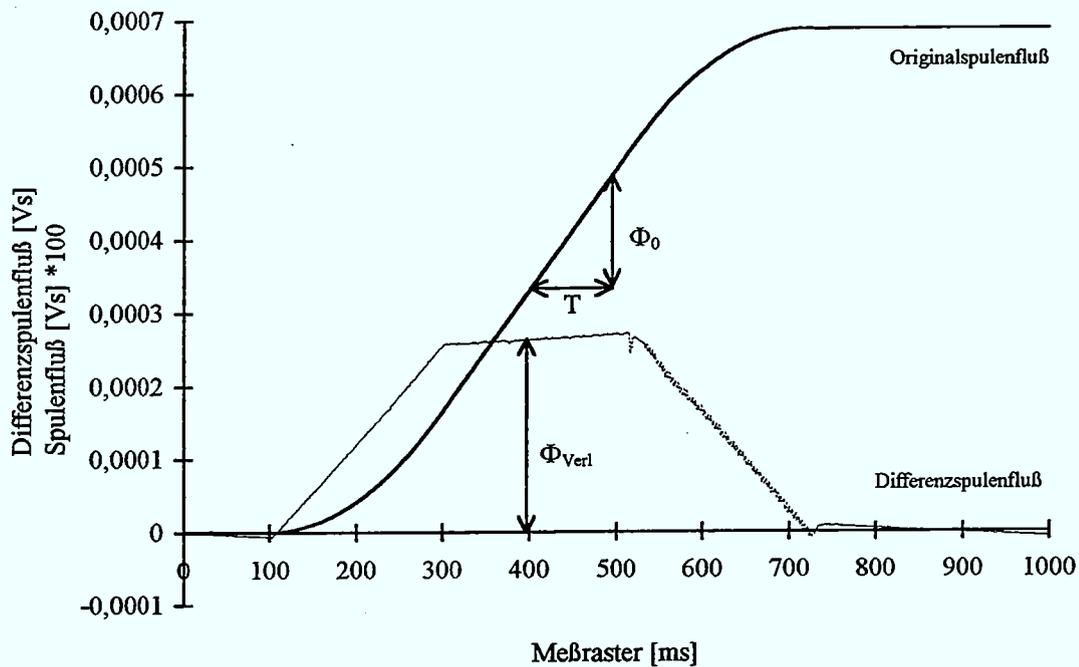
Nach der Korrektur des Differenzflusses stellt sich das in **Abb. 6.15** gezeichnete Kurvendiagramm dar, in dem auch der um den Faktor 100 verkleinerte Originalspulenfluß beinhaltet ist.

Auch hier läßt sich nach der Formel;

$$\tau = \frac{\Phi_{\text{Verl}}}{\frac{\Phi_0}{T}}$$

die Zeitkonstante berechnen.

Für die vorliegende Messung ergibt sich bei  $\Phi_0/T = 16,52 \cdot 10^{-5}$  Vs/ms und einem  $\Phi_{\text{Verl}} = 2,6 \cdot 10^{-4}$  Vs eine Zeitkonstante  $\tau_{\text{Cu}} = 1574 \mu\text{s}$ .



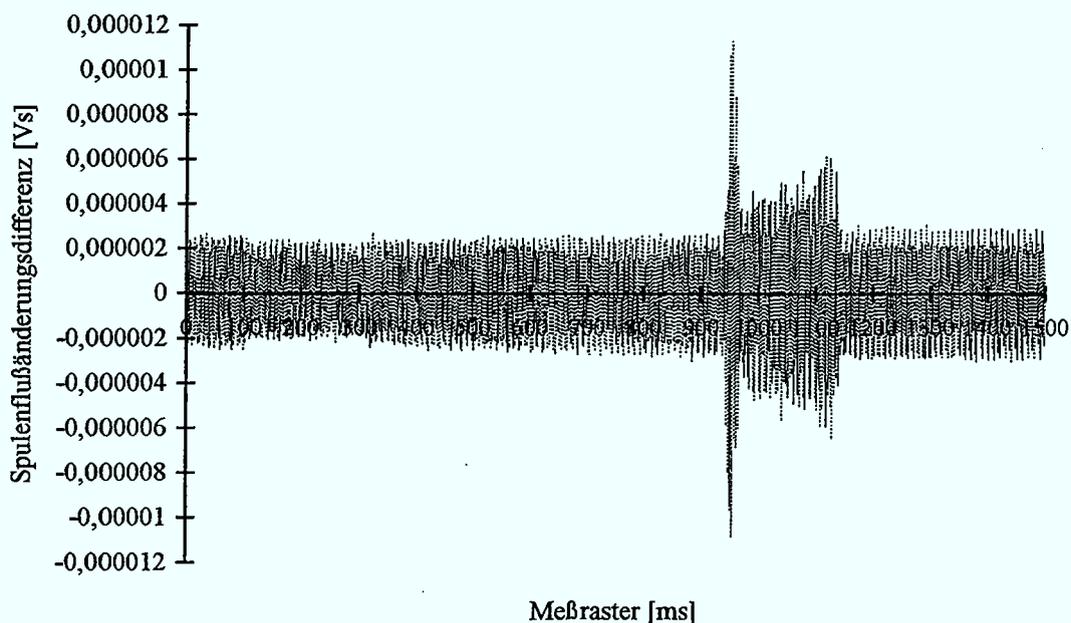
**Abb. 6.15** Differenzspulenfluß und der um den Faktor 100 verkleinerte Originalspulenfluß

#### 6.4 Ermittlung der Zeitkonstante $\tau$ bei unterschiedlichen Einstellungen

Zunächst wird die Stromsteilheit von 600 A/s auf 300 A/s verringert, die Meßposition jedoch beibehalten. Daraus ergeben sich die Einstellungen:

- $I_{\text{Start}} = 50 \text{ A}$
- $dI/dt = 300 \text{ A/s}$
- $I_{\text{Top}} = 300 \text{ A}$
- Meßwinkel  $0^\circ$
- Meßraster 50 mm
- Meßfrequenz 1000 Hz
- Meßanzahl 1500 Messungen je Einzelmessung

Es stellt sich jedoch heraus, daß die Differenzbildung der vom PDI aufgenommenen Spulenflußänderungen (Messung ohne Stahlrohr - Messung mit Stahlrohr) nicht sinnvoll ist, da die Differenz der Spulenflußänderung im Bereich der PDI-Auflösung liegt (Abb 6.16). Die PDI-Auflösung liegt bei  $20 \mu\text{Vs}/\text{Gain}$  [Metro91]; bei einem eingestellten Verstärkungsfaktor von 10 besitzt das PDI eine Auflösung von  $2 \cdot 10^{-6} \text{ Vs}$ .



**Abb. 6.16** Spulenflußänderungsdifferenz (Messung ohne Stahlrohr - Messung mit Stahlrohr)

Aus diesem Grund werden die Zeitkonstanten bei unterschiedlichen Einstellungen nur für das Kupferrohr ermittelt, welches ein größeres Wirbelstromfeld erzeugt und somit auch bei geringeren Spulenflußänderungen eine überhalb der Auflösung des PDI liegende Spulenflußänderungsdifferenz bildet.

Beginnend mit den Einstellungen

- $I_{\text{Start}} = 50 \text{ A}$
  - $dI/dt = 300 \text{ A/s}$
  - $I_{\text{Top}} = 300 \text{ A}$
  - Meßwinkel  $0^\circ$
  - Meßraster  $50 \text{ mm}$
  - Meßfrequenz  $1000 \text{ Hz}$
  - Meßanzahl 1500 Messungen je Einzelmessung
- wird die Zeitkonstante  $\tau_{\text{Cu}}$  für das Kupferrohr ermittelt.

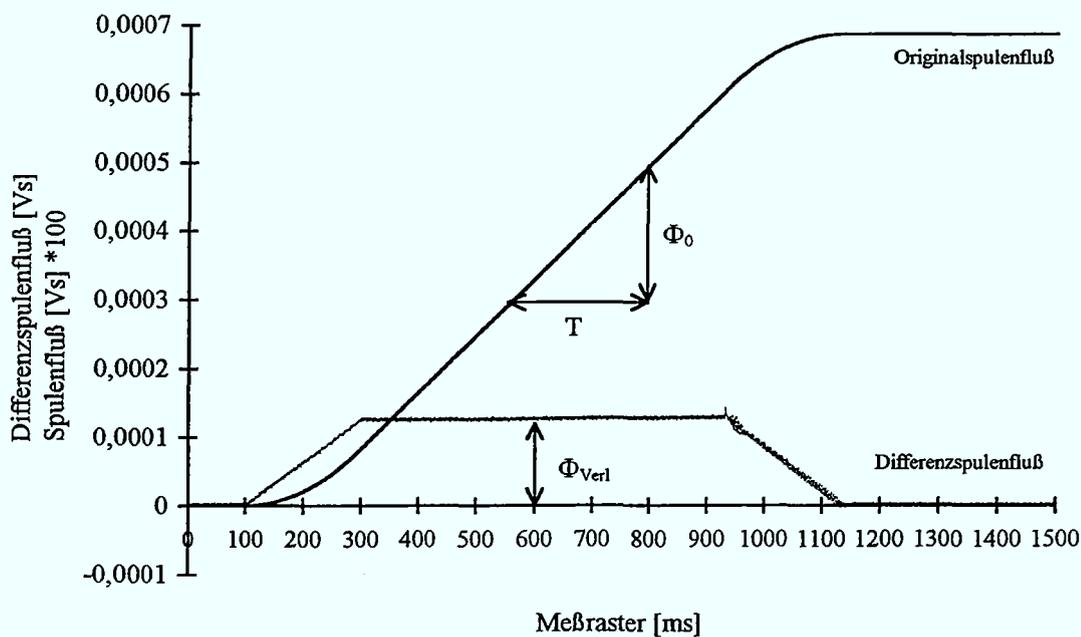
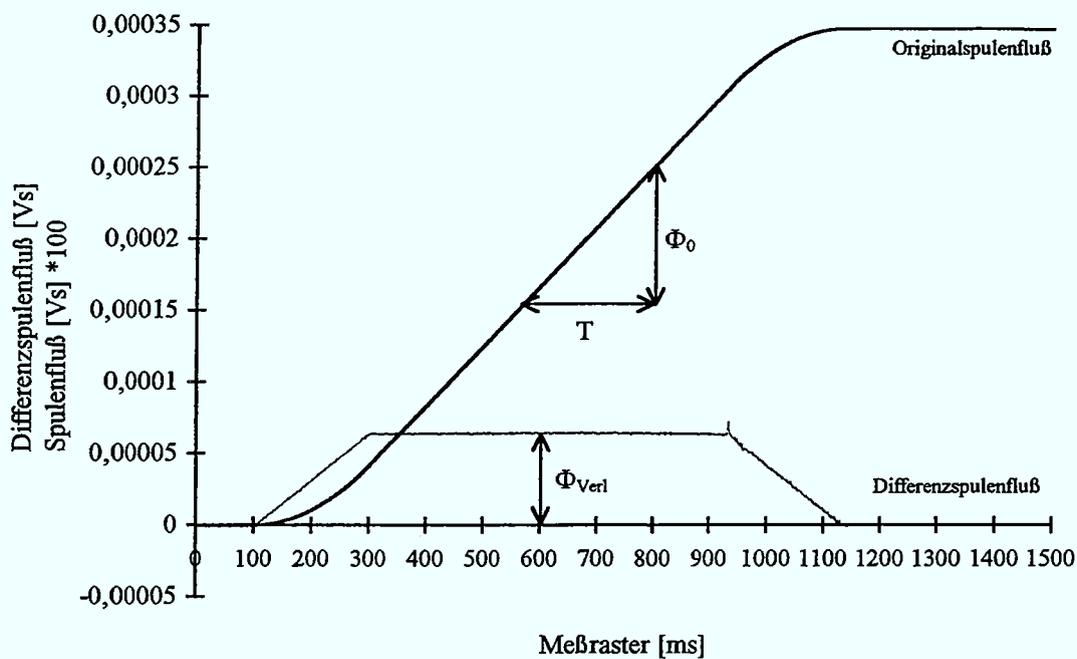


Abb. 6.17 Differenzspulenfluß und der um den Faktor 100 verkleinerte Originalspulenfluß

Für die vorliegende Messung ergibt sich bei  $\Phi_0/T = 8,258 \cdot 10^{-5} \text{ Vs/ms}$  und einem  $\Phi_{\text{Verl}} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Vs}$  eine Zeitkonstante  $\tau_{\text{Cu}} = 1574 \text{ }\mu\text{s}$ .

Wird die gleiche Spulenflußmessung an einer anderen Stelle innerhalb des Quadrupolmagneten vollzogen, so daß sich folgende Einstellungen ergeben:

- $I_{\text{Start}} = 50 \text{ A}$
- $dI/dt = 300 \text{ A/s}$
- $I_{\text{Top}} = 300 \text{ A}$
- Meßwinkel  $0^\circ$
- Meßrastrer 25 mm
- Meßfrequenz 1000 Hz
- Meßanzahl 1500 Messungen je Einzelmessung, erhält man als Ergebnis **Abb. 6.18**.



**Abb. 6.18** Differenzspulenfluß und der um den Faktor 100 verkleinerte Originalspulenfluß

Für die vorliegende Messung ergibt sich bei  $\Phi_0/T = 4,189 \cdot 10^{-5} \text{ Vs/ms}$  und einem  $\Phi_{\text{Verl}} = 6,48 \cdot 10^{-5} \text{ Vs}$  eine Zeitkonstante  $\tau_{\text{Cu}} = 1547 \text{ } \mu\text{s}$ .

Aus diesen unterschiedlichen Meßreihen und den so ermittelten Zeitkonstanten wird ersichtlich, daß die Zeitkonstante  $\tau$  unabhängig von der Stromrampensteilheit sowie dem maximalen Spulenfluß ist und lediglich von der Materialeigenschaft des Vakuumrohres bestimmt wird.

Für den vorliegenden Fall bedeutet dies:

Die Zeitkonstante ist abhängig von dem Vakuumrohrdurchmesser  $d$ , von der Dicke  $b$ , von der Länge  $l$  und der elektrischen Leitfähigkeit  $\chi$  des verwendeten Materials. In der benutzten Versuchsanordnung wurden Vakuumrohre mit folgenden Werten verwendet:

**Stahlvakuumkammer:**

Rohrinnendurchmesser:	150 mm
Rohrdicke:	2 mm
Rohrlänge:	1,553 m
elektrische Leitfähigkeit $\chi$ :	$1,3 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

**Kupfervakuumkammer:**

Rohrinnendurchmesser:	148 mm
Rohrdicke:	1 mm
Rohrlänge:	1,0 m
elektrische Leitfähigkeit $\chi$ :	$56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$

**Anmerkung:**

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß beide Rohre die gleiche Länge besitzen, da in beiden Fällen die Rohre deutlich länger sind als die effektive Länge des Magneten, innerhalb dessen sich die magnetischen Wirbelströme aufbauen. Aus diesem Grund müßte die effektive Länge des Magneten als Rohrlänge eingesetzt werden. Es wird jedoch kein Fehler begangen, sofern in beiden Fällen 1 m als Rohrlänge eingesetzt wird, auch wenn das Stahlvakuumrohr 1,553 m lang ist, da die „Restlänge“ nicht die Wirbelstromstärke beeinflusst.

Somit gilt:

$$R = \frac{1}{\chi \cdot s}$$

$$s = (d + b) \cdot b \cdot \pi$$

**Stahlvakuumkammer:**

$$R = \frac{1 \text{ m}}{1,3 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} * (150 \text{ mm} + 2 \text{ mm}) * 2 \text{ mm} * \pi}$$

$$R_{St} = 785,3 \mu\Omega$$

**Kupfervakuumkammer:**

$$R = \frac{1 \text{ m}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} * (148 \text{ mm} + 1 \text{ mm}) * 1 \text{ mm} * \pi}$$

$$R_{Cu} = 38,15 \mu\Omega$$

Die Stahlvakuumkammer besitzt also einen  $R_{St}/R_{Cu} = 20,58$  mal größeren Widerstand als die Kupferkammer, während die Zeitkonstante  $\tau_{St}$  bei der Stahlvakuumkammer um den Faktor 20,2 kleiner ist als die Zeitkonstante  $\tau_{Cu}$  der Kupfervakuumkammer. Dadurch wird ersichtlich, daß die Wirbelstromgröße umgekehrt proportional dem elektrischen Widerstand  $R$  ist.

## Kapitel 7

### Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit ist ein rechnerunterstützter und menügesteuerter Meßaufbau entstanden, mit dem dynamische Magnetfelder vermessen werden können.

Zur Strommessung wird ein Null-Fluß-Strom-Wandler (DCCT) der Firma Danfysik in Verbindung mit einem Präzisionsspannungsmeßgerät der Firma Hewlett Packard verwendet. Dabei wird eine Meßauflösung von  $< 6$  ppm, bezogen auf den Nennstrom des DCCT (3125 A), erreicht, wobei die Meßergebnisse bereits im Rauschbereich des AEG-Netzgerätes liegen.

Zur Bestimmung des magnetischen Spulenflusses wird ein totzeitfreier Integrator (PDI) der Firma Metrolab verwendet, der die Flußänderungen innerhalb einer ruhenden Meßspule aufnimmt. Hierbei wird bei der Differenzbildung zweier Spulenflüsse eine Genauigkeit von  $< 6 \cdot 10^{-5}$  Vs erreicht, wobei der Fehler hauptsächlich aus einem Gradientenfehler besteht, der durch eine Korrekturrechnung behoben werden kann. So bleibt lediglich ein Offsetfehler von  $< 2 \cdot 10^{-6}$  Vs, der sich nicht mehr vermindern läßt.

Im Meßaufbau wurden minimale Integrationszeiten von 1 ms realisiert, mit denen der Spulenfluß gemessen wird. Die Integrationszeit, die von der Genauigkeit des eingesetzten Puls-/Funktionsgenerators der Firma Hewlett Packard abhängt, ist dabei auf  $< 1 \mu\text{s}$  genau bestimmt.

Aus dem Vergleich zweier unterschiedlich aufgenommener Spulenflüsse (ohne Vakuumgefäß bzw. mit Vakuumgefäß) ist zu erkennen, daß die innerhalb des Vakuumgefäßes entstehenden Wirbelströme proportional zur elektrischen Leitfähigkeit des verwendeten Materials sind. Das aus den Wirbelströmen resultierende  $PT_1$  Verhalten, mit dem sich das Magnetfeld innerhalb des Vakuumgefäßes im Gegensatz zur „originalen“ Magnetfeldmessung aufbaut, ist somit ebenfalls proportional zur elektrischen Leitfähigkeit  $\chi$  des Vakuumgefäßmaterials (siehe **Tabelle 7.1**).

$dI/dt$	Meßweite	Vakuumpfäß- material	Widerstand $R = \frac{l}{\chi \cdot s}$	Zeitkonstante
600 A/s	50 mm	Stahl	785,3 $\mu\Omega$	78 $\mu s$
600 A/s	50 mm	Kupfer	38,15 $\mu\Omega$	1574 $\mu s$
300 A/s	50 mm	Kupfer	38,15 $\mu\Omega$	1574 $\mu s$
300 A/s	25 mm	Kupfer	38,15 $\mu\Omega$	1547 $\mu s$

Bei allen Messungen wurde die Stromrampe von 50 Ampere auf 300 Ampere gefahren.

**Tabelle 7.1** Auflistung der gemessenen Zeitkonstanten

Da während dieser Diplomarbeit lediglich die Spulenflußvergleiche zweier unterschiedlicher Messungen betrachtet werden, wobei sich die Gradientenfehler mit Hilfe einer Korrekturrechnung beheben lassen, haben die Ungenauigkeiten der Spulenträgerpositionierung keinen Einfluß auf die Meßergebnisse. Sollten jedoch direkt die Spulenflüsse bzw. die Magnetfelder interpretiert werden, so wäre es ratsam, sich eines anderen Spulenträgerhalters zu bedienen, da hierbei keinerlei Korrekturmöglichkeit besteht.

## Kapitel 8

### Anhang

In diesem Kapitel werden zum einen die Befehle für die Standardinitialisierung für die Meßgeräte sowie eine kurze Erklärung zu jedem einzelnen Befehl und zum anderen einige für die Arbeit wichtige Daten aufgelistet.

#### 8.1 Befehlsliste des HP 3458A DVM

Syntax	Beschreibung
RESET	Auf den Anfangszustand setzen
TRIG HOLD	Lesevorgang aufheben
CSB	Statusregister auf 0 setzen
LFREQ 50	Referenzfrequenz auf 50 Hz einstellen
APER 800e-6	Integrationszeit mit 800 $\mu$ s wählen
DCV 10	Meßbereich auf 10 V DC stellen
MFORMAT DINT	Löschen des Speichers und Double Integer Speicherformat festlegen (32 bits)
AZERO OFF	Automatische Nullfunktion deaktivieren
NRDGS 1,AUTO	Anzahl der Messungen pro Triggerung wird auf 1 festgelegt
MEM FIFO	Speichermodus auf First In/First Out setzen
DISP OFF,'MESSUNG!!!'	Ausalten der Anzeigefunktion
NRDGS,...EXT	Meßwerteanzahl ist variabel einstellbar

**Tabelle 8.1** Standardinitialisierung des HP 3458A DVM

## 8.2 Befehlsliste des HP 8161A Puls-/Funktionsgenerators

Syntax	Beschreibung
M8	Auswahl der Betriebsart „E.Burst“
T1	Triggerstart auf positiver Flanke
DTY 50%	Einstellen des Tastverhältnisses auf 50%
CT0	Ausschalten des Controlmodes
WID 200ns	Einstellen der Impulsdauer auf 200 ns
BUR...#	Anzahl der Bursts ist variabel einstellbar
FREQ...Hz	Frequenzeinstellung ist variabel

Tabelle 8.2 Standardinitialisierung des HP 8161A

## 8.3 Befehlsliste des PDI 5025

Syntax	Beschreibung
BRK	Abbrechen des Meßvorganges
ISC,0	Eingang ist nicht kurzgeschlossen
CHA,A	Ausgewählter Kanal A
SGA...	Verstärkungsfaktoreinstellung ist variabel
NBO,1	Kein Abbruch bei Overage
CUM,0	Integrierte Werte werden separat gespeichert
IMD,1	Meßwerte werden einzeln ausgelesen
TRS,X	Externe Hardwaretriggerquelle
FPT,1	Ermöglicht die Frontpaneltriggerung
DSP,B,Aus	Sendet Display B „Aus“
RUN	Aktivieren des Stand-by Betriebes

Tabelle 8.3 Standardinitialisierung des PDI 5025

## 8.4 Meßspulendaten

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

Tabelle 8.4.a Daten zur Meßspulengeometrie

Name der Spulenträgers:	B
Anzahl der Spulensätze:	4
X Koordinate des Spulensatzschwerpunktes a:	-15,0025
Y Koordinate des Spulensatzschwerpunktes a:	-9,27
Breite des Spulensatzes a:	5,00
Anzahl der Spulen im Spulensatz a:	4
Länge der Spule 0:	1593,060059
Anzahl der Windungen in der Spule 0:	100
gemessene Windungsfläche der Spule 0:	795597,1875

Länge der Spule 1:	643,059998
Anzahl der Windungen in der Spule 1:	100
gemessene Windungsfläche der Spule 1:	324416,1
Länge der Spule 2:	643,059998
Anzahl der Windungen in der Spule 2:	100
gemessene Windungsfläche der Spule 2:	326581,2
Länge der Spule 3:	1593,060059
Anzahl der Windungen in der Spule 3:	100
gemessene Windungsfläche der Spule 3:	797376,5
Abstand der Kreismittelpunkte von Spule 0 und Spule 1:	6,94
Fehllänge zwischen Spule 0 und Spule 1:	3,013009
Fehlfläche zwischen Spule 0 und Spule 1:	15,065046
Abstand der Kreismittelpunkte von Spule 1 und Spule 2:	6,94
Fehllänge zwischen Spule 1 und Spule 2:	3,013009
Fehlfläche zwischen Spule 1 und Spule 2:	15,065046
Abstand der Kreismittelpunkte von Spule 2 und Spule 3:	6,94
Fehllänge zwischen Spule 2 und Spule 3:	3,013009
Fehlfläche zwischen Spule 2 und Spule 3:	15,065046
X Koordinate des Spulensatzschwerpunktes b:	15,0025
Y Koordinate des Spulensatzschwerpunktes b:	-9,27
Breite des Spulensatzes b:	5,00
Anzahl der Spulen im Spulensatz b:	4
Länge der Spule 0:	1593,060059
Anzahl der Windungen in der Spule 0:	0
gemessene Windungsfläche der Spule 0:	0
Länge der Spule 1:	0
Anzahl der Windungen in der Spule 1:	0
gemessene Windungsfläche der Spule 1:	0
Länge der Spule 2:	0
Anzahl der Windungen in der Spule 2:	0
gemessene Windungsfläche der Spule 2:	0
Länge der Spule 3:	0
Anzahl der Windungen in der Spule 3:	0
gemessene Windungsfläche der Spule 3:	0
Abstand der Kreismittelpunkte von Spule 0 und Spule 1:	0

Fehllänge zwischen Spule 0 und Spule 1:	0
Fehlfläche zwischen Spule 0 und Spule 1:	0
Abstand der Kreismittelpunkte von Spule 1 und Spule 2:	0
Fehllänge zwischen Spule 1 und Spule 2:	0
Fehlfläche zwischen Spule 1 und Spule 2:	0
Abstand der Kreismittelpunkte von Spule 2 und Spule 3:	0
Fehllänge zwischen Spule 2 und Spule 3:	0
Fehlfläche zwischen Spule 2 und Spule 3:	0
X Koordinate des Spulensatzschwerpunktes c:	-15,0025
Y Koordinate des Spulensatzschwerpunktes c:	9,27
Breite des Spulensatzes c:	5,00
Anzahl der Spulen im Spulensatz c:	2
Länge der Spule 0:	2243,060059
Anzahl der Windungen in der Spule 0:	100
gemessene Windungsfläche der Spule 0:	100,00
Länge der Spule 1:	2243,060059
Anzahl der Windungen in der Spule 1:	100
gemessene Windungsfläche der Spule 1:	100,00
Abstand der Kreismittelpunkte von Spule 0 und Spule 1:	6,94
Fehllänge zwischen Spule 0 und Spule 1:	3,013009
Fehlfläche zwischen Spule 0 und Spule 1:	15,065046
X Koordinate des Spulensatzschwerpunktes d:	15,0025
Y Koordinate des Spulensatzschwerpunktes d:	9,27
Breite des Spulensatzes d:	5,00
Anzahl der Spulen im Spulensatz d:	1
Länge der Spule 0:	4493,060059
Anzahl der Windungen in der Spule 0:	100
gemessene Windungsfläche der Spule 0:	100,00

**Tabelle 8.4.b** Spulendaten des Spulenträgers B

Alle mit Null angegebenen Werte sind nicht bekannt

## 8.5 Magnetdaten

Magnettyp	MQT
Anzahl der Magnete im Ring	32
Spulen pro Magnet	4
Windungszahl pro Spule	48
Leiterquerschnitt	8*15 mm <sup>2</sup>
Nennstrom	522A
Widerstand pro Spule	17,7 mΩ
Spannungsabfall pro Spule	9,24 V
Leistung (Gleichstrom)	4,8 kW
Leistung (Rampe)	7,6 kVA
Maximales Feld am Pol	0,65 T
Gradient	7,65 T/m
Apertur Radius	85 mm
nutzbare Apertur vertikal	± 20 mm
nutzbare Apertur horizontal	± 100 mm
Eisenlänge	570 mm
Mechanische Länge	686 mm
Eisenblech Höhe	1090 mm
Eisenblech Breite	910 mm
Jochgewicht	ca. 3,7 t

**Tabelle 8.5** Auflistung der Grunddaten eines Quadrupolmagneten vom Typ MQT

## 8.6 Parametereingaben der Positioniereinrichtung

Parameterblock B (die Einstellungen für die anderen Verfahrachsen sind entsprechend)

A	Datenformat	(1 ... 65535)	1
C	Getriebefaktor Zähler	(0 ... 4)	2
B	Getriebefaktor Nenner	(1 ... 65535)	2
D	Schleppfaktor	(1 ... 65535)	200
E	Rampe	(1 ... 65535)	100
F	KV Faktor	Schritt	1
G	Start/Stop		0,02 Hz
H	+ Verfahrbereich		10000,00 mm
I	- Verfahrbereich		-10000,00 mm
J	Eilgang		15000,00 Hz
K	Referenzlaufgeschwindigkeit		-5000,00 Hz
L	Spielausgleich	(1 ... 200)	0
M	Fertigmeldung vor Endposition		5
N	Freifahren des Referenzschalters		200

Tabelle 8.6 Parametereingabeblock der CNC-Positioniereinrichtung

## 8.7 Schnittstellenkonfiguration der IEEE 488.2

[GPIB0]			; board name - DON'T CHANGE THIS
cecbase	=	0x2b8	; Base I/O address of card ; (doesn't matter for PS<>488)
pad	=	0	; Primary GPIB address, decimal
sad	=	none	; Secondary GPIB address ; decimal, or "0x" prefix for hex or "none"
tmo	=	T10s	; Timeout: T100msec, T300msec, ; T1s, T3s, T10s, T30s, T100s
cecdma	=	-1	; DMA channel (-1 for none)
tmng	=	500nsec	; GPIB bus timing 500nsec or 350nsec ; (can use 350nsec if total cable length < 15 ; meters and all devices powered on)

eot	=	yes	; Send EOI with last byte?
eos	=	13	; End-of-String character code, decimal
reos	=	yes	; Stop read on end-of-string?
xeos	=	yes	; Send EOI with end-of-string chars?
bin	=	7-bit	; End-of-String 7 bits or 8 bits?
sc	=	yes	; Is this board System Controller?
sre	=	yes	; Set remote enable true automatically?
cic_prot	=	no	; Use NI protocol to request control?
autopoll	=	no	; Automatically serial poll devices ; if SRQ is true?
ieee488.2	=	yes	; Enable 488.2?
[DEV1]			; device name
pad	=	1	
sad	=	none	
tmo	=	T10s	
eot	=	yes	
eos	=	13	
reos	=	yes	
xeos	=	yes	
bin	=	7-bit	
raddr	=	no	; Repeat device addressing when same ; operation to same device has just occurred?
connect	=	GPIB0	; Which GPIB board is this device ; connected to?

**Tabelle 8.7** Schnittstelleneinstellungen der IEEE 488.2

### 8.8 Kennwerte zum COSY - Vakuumgefäß

Stoffnummer	1.4429
Kurzname	X2 CrNiMoN 18 12

Zusammensetzung	C ≤ 0,003 %
	Si ≤ 1 %
	Mn ≤ 2 %
	P ≤ 0,045 %
	S ≤ 0,03 %
	Cr 16,5 - 18,5 %
	Mo 2,5 - 3 %
	Ni 12 - 14,5 %
	N 0,14 - 0,22 %
Dichte	7,95 kg/dm <sup>3</sup>
spezifischer el. Widerstand (Resistivität)	0,75 $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

Tabelle 8.8 Wichtige Kennwerte zum COSY - Vakuumgefäßes

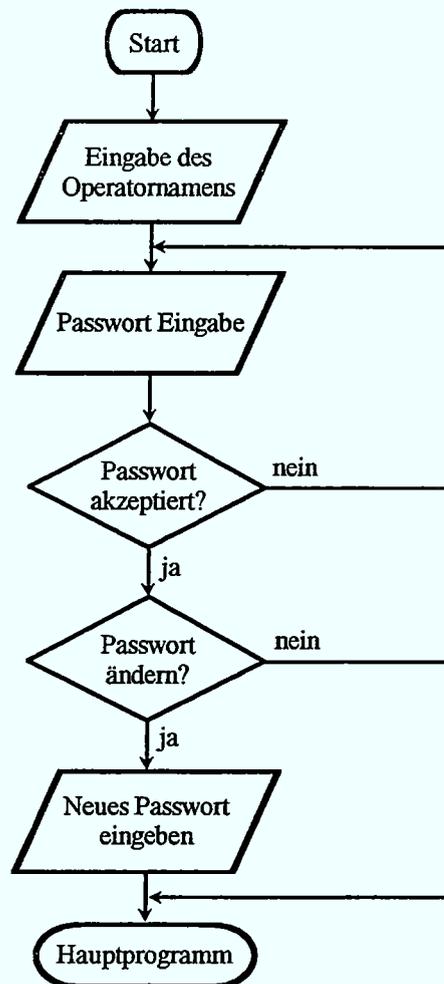
## 8.9 Das Meßprotokoll

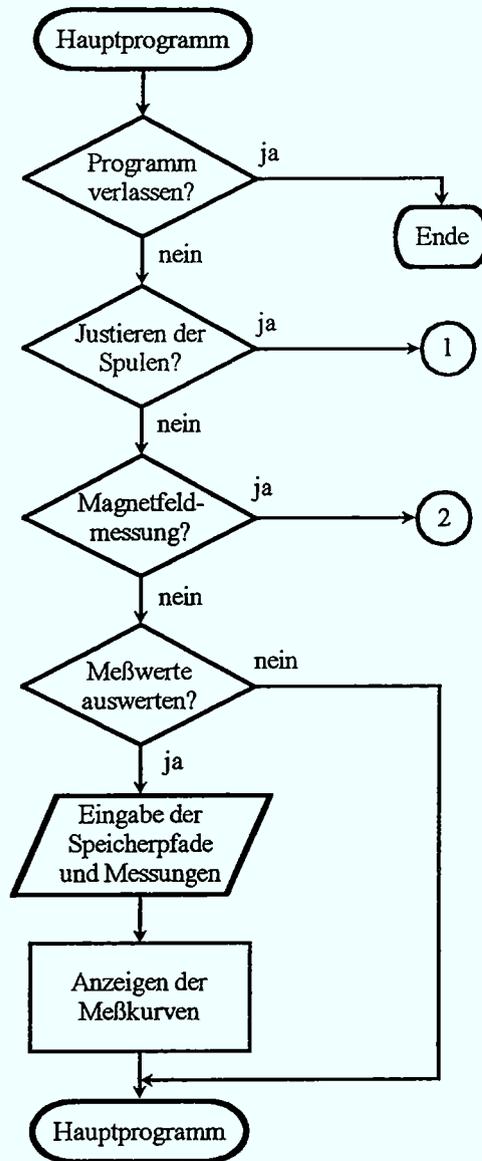
### Deckblatt zum Meßprotokoll

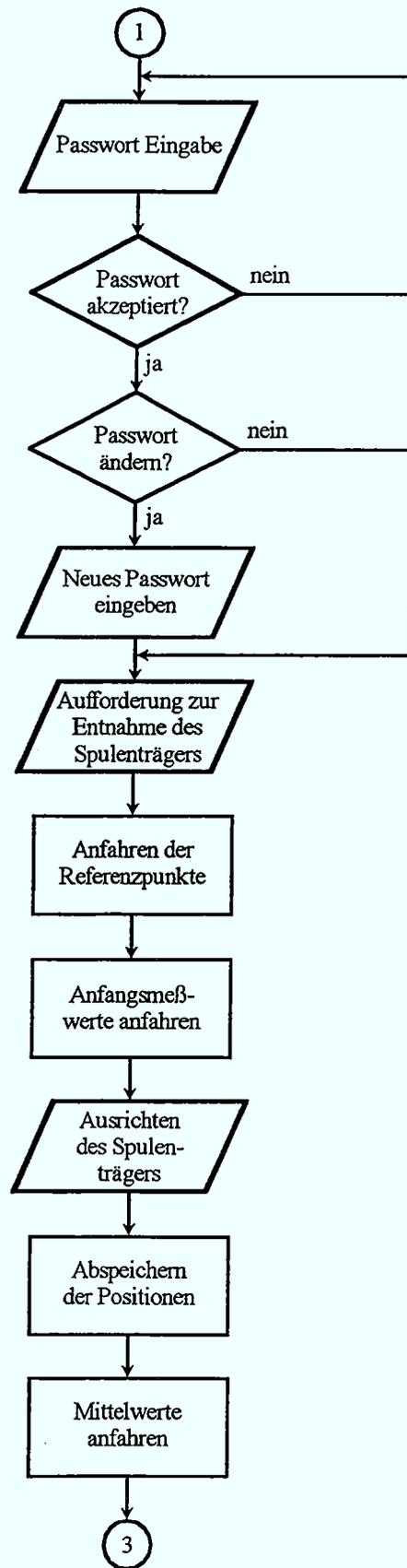
Datum:	10/06/95
Uhrzeit:	09:39 AM
Operator:	Lainck
Messobjekt:	Versuc85
Meßstrom:	300 A
Stromsteilheit:	300 A/s
Anfangsstrom:	50 A
Meßradius:	25 mm
Meßschrittweite:	25 mm
Meßwinkelabstand:	360 Grad
Anzahl der Messungen pro Stromrampe:	1500
Meßfrequenz:	1000 Hz
Spulenträger:	B
Spulensatz:	d
Kommentar:	Es wurde mit einem Kupferrohr gemessen

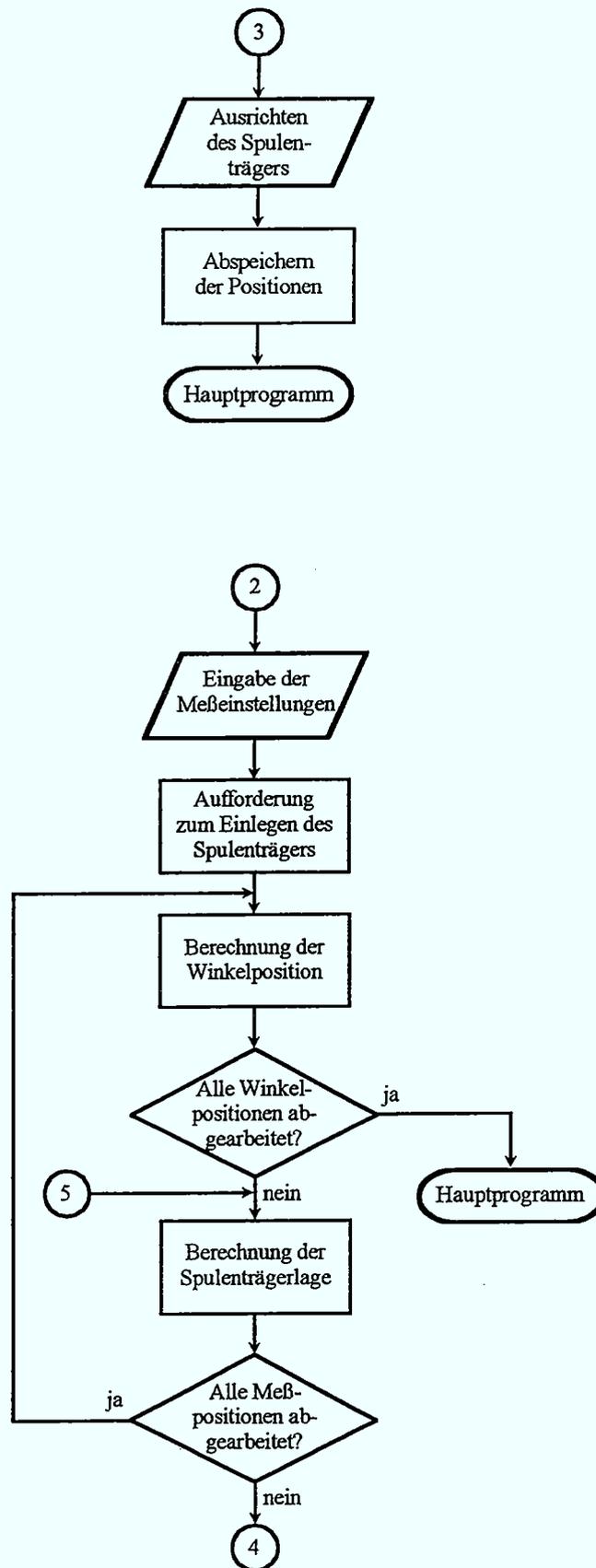
## 8.10 Flußdiagramm des Meßprogramms

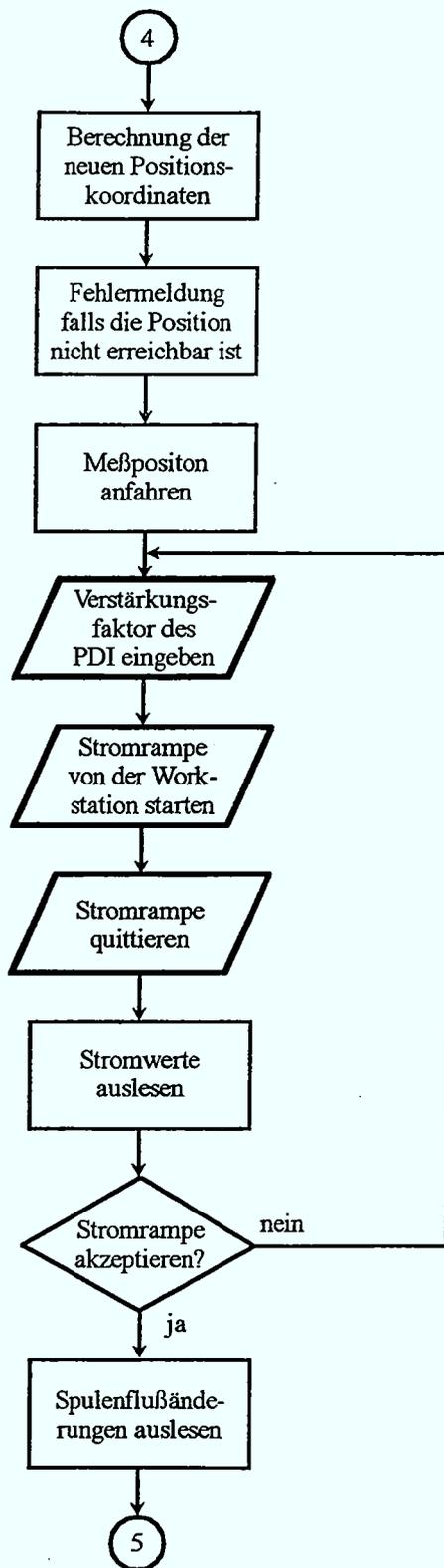
Hinweis: Das Flußdiagramm wird hier stark gekürzt dargestellt.











## Kapitel 9

### Literaturverzeichnis

- [Cosy86] Arbeitsgruppe Cosy: Kühler Synchrotron Cosy, Technische Beschreibung; Jül-Spez.-370, KFA Jülich Sep. 1986
- [Dahn93] H.G.Dahn: Praxisbuch LabVIEW 3; IWT Verlag 1993
- [Danf] Manual Ultrastab 861R 1000 A Current Transducer; Danfysik A/S Jyllinge Denmark
- [Dobr88] Dobrinski, Krakau, Vogel: Physik für Ingenieure; Teubner Verlag 1998
- [Froh94] Heinrich Frohne: Elektrische und magnetische Felder; Teubner Verlag 1994
- [HPDVM] Hewlett Packard: Operating, Programming and Configuration Manual HP 3458A Multimeter; California (USA) 1988
- [HPPuls] Hewlett Packard: Operating and Service Manual Programmable Pulse Generator 8161A; Böblingen 1990
- [Lind91] Helmut Lindner: Physik für Ingenieure; Vieweg Verlag 1991
- [Liss79] J.Lisser, E.Ribbernick: Nullfluß-Stromwandler zur Messung von Gleich- und Wechselströmen; ETZ BD. 100 Heft 24 1979
- [Metro91] Metrolab Instruments: User Manual Precision Digital Integrator (PDI 5025) zur EPROM Version 2.01; Genf 1991
- [NaIn93] National Instruments: LabVIEW for Windows User Manual; National Instruments 1993

- [Phil86] Eugen Philippow: Taschenbuch Elektrotechnik Band 1 Allgemeine Grundlagen; Carl Hanser Verlag München 1986
- [SM2000] SM2000: Bedienungsanleitung, Programmieranleitung und Anschlußplan; Schwenningen SM Elektronik GmbH 1988
- [Stob93] Volker Stobik: Aufbau und Inbetriebnahme eines rechnergesteuerten Meßplatzes zur dynamischen Vermessung von Dipolrampen an Cosy; Jül-2735, KFA Jülich Febr. 1993

**Jül-3146**  
**November 1995**  
ISSN 0944-2952