

DEUTSCHES ELEKTRONEN - SYNCHROTRON  
(DESY)

Hamburg-Gr. Flottbek 1, Flottbeker Drift 56

DESY-Bibliothek

DESY A 2.20

Hamburg, den 4.3.1958  
Dr.Ho/Schw.

Zusammenfassende Übersicht über die gebräuchlichsten Verfahren  
zur Ausmessung magnetischer Felder und ihre Anwendung auf die  
Vermessung eines Synchrotronmagneten

- A. Allgemeines
- B. Übersicht über die gebräuchlichsten Meßmethoden
  - a) Rotierende Spulen
  - b) Hall-Generatoren
  - c) Widerstandsmagnetometer
  - d) Feststehende Induktionsspulen
  - e) Spin-Resonanzen
  - f) Peaking-Strips
- C. Das Genfer Meßprogramm
  - I. Praxis der Messungen
    - a) Messung des Gradienten
      - 1. Der Absolutwert des Gradienten am Sollkreis bei verschiedenen  $B_0$
      - 2. Der Gradient als Funktion des Radius (n-Plateau) bei verschiedenen  $B_0$
    - b) Messung des Sollkreisfeldes  $B_0 = B_0(I)$  als Funktion des Erregerstroms
    - c) Messung des remanenten Feldes
    - d) Bestimmung der Mittelebene
  - II. Meßmaschinen
  - III. Spulenbau und Eichung
- D. Vorschläge für DESY
- E. Anhang
  - I. Die Einschußzeit
  - II. Schaltung des Integrators und des Stromdiskriminators

### A. Allgemeines

Die Theorie der Teilchenbahnen in einem Synchrotron verlangt, daß die Vertikalkomponente des Magnetfeldes in einem Beschleuniger nach

$$B(r) = B_0 \left( 1 + \frac{n}{\rho_0} r \right) \quad (1)$$

mit dem Radius veränderlich ist. Es bedeuten hierbei

$B(r) = \mathfrak{B}_z(r)$  = Vertikalkomponente des Magnetfeldes an der Stelle  $\varrho = \varrho_0 + r$

$\varrho_0$  = Radius der Bahn eines Sollteilchens im Magnetfeld

$r = \varrho - \varrho_0$  = Radialkoordinate, bezogen auf die Sollbahn

$B_0 = B(\varrho_0)$

$n = \frac{\varrho_0}{B_0} \cdot \frac{\partial B}{\partial r}$  = Feldindex

n hat dabei in aufeinanderfolgenden Sektoren verschiedenes Vorzeichen, so daß das Feld entweder mit dem Radius zu- oder abnimmt.

Den nach (1) geforderten Feldverlauf erreicht man in einem Hyperbelfeld der Abb. 1. Geht man weit genug in den schraffierten Teil des Feldes, so genügt es, das Feld dadurch zu realisieren, daß man zwei der Hyperbeln durch entsprechende Polschuhflächen aus Eisen nachbildet. Aufgabe des Magnetkonstruktors ist es nun, mit Polschuhen endlicher Ausdehnung und endlicher Permeabilität ein Feld zu realisieren, das wenigstens im Bereich der Vakuumkammer dem idealen Hyperbelfeld innerhalb der zulässigen Toleranzen gleicht.

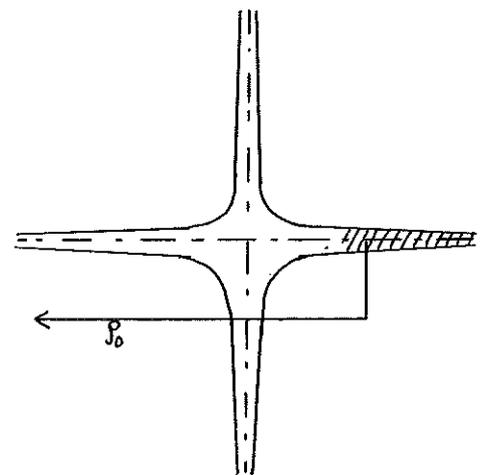


Abb. 1

Die Anforderungen an die Genauigkeit, mit der das ideale Hyperbelfeld angenähert werden soll, sind recht erheblich. Man verlangt, daß sich der Feldindex während des gesamten Beschleunigungsvorganges, d.h. über alle vorkommenden Feldstärken, weder in azimuthaler noch in radialer Richtung merklich ändert. Sein Absolutwert sollte, abgesehen von Randeffekten, auf weniger als 1 % konstant sein, die relativen Unterschiede zwischen einzelnen Teilen des Magneten sollten einige ‰ nicht überschreiten.

Ähnliche Forderungen werden an das Magnetfeld B gestellt, wobei es allerdings weniger auf den Absolutwert desselben ankommt als darauf, daß  $B(t)$  nicht vom Azimut abhängt. Die letztere Forderung ist, wenigstens bei kleinen Feldern, nicht ganz einfach zu erfüllen, da hierbei sowohl die durch Wirbelströme erzeugten Störfelder als auch das remanente Feld einen merklichen Bruchteil des Sollfeldes ausmachen.

Das Meßprogramm der Magnetgruppe läßt sich in die folgenden Abschnitte einteilen:

- a) Grundlegende Messungen im Analogverfahren (elektrolytischer Trog, Widerstandspapier) und an Modellen zur Festlegung der günstigsten Polschuhform.
- b) Serienmessungen an den kleinsten Einheiten des Magneten, den Blocks.
- c) Messungen an den fertig montierten Feldeinheiten.

Die Anforderungen an die Meßgeräte sind physikalischer und technischer Art. Die Geräte bzw. das Meßverfahren, das ihnen zugrunde liegt, müssen so beschaffen sein, daß die zu erwartenden Meßfehler merklich unterhalb der Größe der zulässigen Toleranzen des Magnetfeldes liegen. Es genügt aber nicht, daß diese Genauigkeit prinzipiell erreicht werden kann, sondern die technische Ausführung der Meßgeräte muß eine große Zahl von Messungen ohne erheblichen Zeitaufwand mit gleichmäßiger Präzision zulassen. Geeignete, möglichst wenig Zeit beanspruchende Eichverfahren müssen eine häufige, sichere

Kontrolle aller Meßwerkzeuge und Apparate gestatten, damit die Reproduzierbarkeit gewährleistet und der Vergleich von Messungen, die zu verschiedenen Zeiten vorgenommen wurden, möglich ist.

Da das Hamburger Synchrotron mit einer Wiederholungsfrequenz von 50 Hz betrieben werden soll, müssen die Messungen im wesentlichen bei dynamischen Feldern vorgenommen werden. Es treten hierbei Feldänderungsgeschwindigkeiten bis zu  $10^6$  G/sec auf. Ein besonderes Problem ist in diesem Zusammenhang die Auslösung des Injektionsvorganges, die im Moment des Durchganges durch eine bestimmte Feldstärke mit großer Präzision innerhalb von ca.  $10^{-7}$  sec zu erfolgen hat.

## B. Übersicht über die gebräuchlichsten Meßverfahren

Im folgenden soll eine kurze Übersicht über die gebräuchlichsten Methoden zur Ausmessung magnetischer Felder gegeben werden:

### a) Rotierende Spulen

Eines der gebräuchlichsten Hilfsmittel, das sich mit ausreichender Präzision leider nur in Gleichfeldern anwenden läßt, ist die rotierende Spule. Läßt man eine Spule mit der Windungsfläche  $F$  in einem Magnetfeld  $B$  um eine Achse rotieren, die sowohl auf  $B$  als auch auf der Spulenachse senkrecht steht, so wird in ihr die Spannung

$$U = B F \omega \cos \omega t \quad (2)$$

induziert. Mit dieser Methode lassen sich statische Felder mit großer Genauigkeit messen, wenn man auf der gleichen Achse eine zweite Spule gleicher Windungsfläche anbringt, die in dem bekannten Feld einer Helmholtzspule rotiert. Durch Gegeneinanderschalten beider Spulen kann man die Messung zu einer empfindlichen Nullmethode ausgestalten, deren Genauigkeit, außer von der mechanischen Stabilität der Anordnung, im wesentlichen von der Möglichkeit einer präzisen Strommessung in der Helmholtzspule bestimmt wird. Für dynamische Messungen ist die Drehspule wenig geeignet.

### b) Hall-Generatoren

Bringt man einen stromdurchflossenen Leiter in ein Magnetfeld, so entsteht, wenn Strom und Magnetfeld senkrecht aufeinander stehen, eine Spannung in Richtung senkrecht zu Strom und Magnetfeld (Hall-Effekt). Diese Spannung ist dem Produkt aus Strom und Magnetfeld proportional. Die erreichbare Genauigkeit ist wegen der geringen Spannungen und der dadurch bedingten großen Empfindlichkeit gegenüber Thermo- und Kontaktspannungen bei Feldern über  $500\Gamma$  höchstens 3 ‰, bei kleineren Feldern noch geringer. Außerdem sind Hall-Generatoren wegen des Auftretens von Wirbelströmen bei schnell veränderlichen Feldern nicht zu verwenden.

c) Widerstandsmagnetometer

Bringt man einen Draht aus Wismut in ein Magnetfeld, so ändert sich sein Widerstand quer zur Magnetisierungsrichtung. Die relative Änderung des Widerstandes ist eine Funktion des Magnetfeldes und, außer bei sehr kleinen Feldern, praktisch linear. Die erreichbare Empfindlichkeit ist begrenzt. Sie nimmt zwar mit abnehmender Temperatur des Drahtes zu, aber selbst bei der Temperatur flüssiger Luft ist höchstens eine Meßgenauigkeit von einigen Zehntelgauß zu erzielen.

d) Feststehende Induktionsspulen

Verändert man das Magnetfeld in einer Spule mit der Windungsfläche  $F$ , so mißt man an ihren beiden Enden eine Spannung

$$U = F \dot{B}$$

Diese Spannung ist also der zeitlichen Änderung des Feldes proportional. Da man das Feld selbst messen will, muß man die Spannung über die Zeit integrieren:

$$B(t) = B(t_0) = \frac{1}{F} \int_{t_0}^{t_1} U dt \quad (4)$$

Diese zeitliche Integration geschieht im einfachsten Falle mit einem stark gedämpften Galvanometer (Fluxmeter) oder mit einem elektronischen Integrator. Der Vorteil einer solchen Anordnung ist, daß sie bei genügend solidem mechanischen und elektrischen Aufbau auch für Serienmessungen mit großer Genauigkeit brauchbar ist. Ihre Begrenzung liegt einmal in der Genauigkeit des integrierenden Teiles, zum anderen in der Präzision der Spulen. Da hierbei nur das dynamische Feld gemessen werden kann, muß man das remanente Feld extra messen, was jedoch bei genügend großer Zeitkonstante des Integrators mit demselben Gerät, eventuell nur mit größerer Spule, möglich ist. Ebenso ist es möglich, durch Anwendung verschieden großer Spulen entweder Punktmessungen vorzunehmen oder den Mittelwert über einen größeren azimutalen Bereich zu messen.

e) Spin-Resonanzen

Ein sehr empfindliches und genaues Mittel zur Ausmessung homogener Magnetfelder erhält man bei Ausnutzung der Resonanzabsorbtionen oder Resonanzausstrahlungen von im Magnetfeld polarisiertem Kern- oder Elektronenspins.

Im Prinzip ist die Anordnung folgende: Man bringt eine kleine Menge einer Substanz, zum Beispiel Wasser (Protonen) in das zu messende Magnetfeld. Die Probe ist gleichzeitig von einer Spule senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes umgeben, in der ein hochfrequenter Wechselstrom der Frequenz  $\nu$  fließt. Die Protonen haben im Magnetfeld eine bestimmte Einstellenergie

$$W = \pm \mu H \quad (5)$$

$\mu$  = das mit dem Spin verbundene magnetische Moment. Es existieren also (Spin 1/2) zwei Energiezustände, die sich um den Betrag  $2\Delta W$  unterscheiden. Ist die Quantenenergie des hochfrequenten Wechselfeldes gerade gleich dieser Energiedifferenz, so treten erzwungene Übergänge auf, die sich durch den Entzug von Energie aus dem Wechselfeld und durch Ausstrahlungen in einer Richtung senkrecht zur Spulenachse und senkrecht zum Magnetfeld bemerkbar machen. Im Resonanzfalle gilt also

$$h \nu = 2 \mu H \quad (6)$$

bzw.  $H \sim \nu \quad (7)$

Die Magnetfeldmessung ist also auf eine Frequenzmessung zurückgeführt, die eine große Genauigkeit zuläßt.

Da zur Erreichung ausreichend großer Signale die geometrische Ausdehnung der Probe nicht beliebig klein gemacht werden kann, ist diese Methode in stark inhomogenen Feldern, wie sie bei AG-Fokussierung vorkommen, im allgemeinen wenig geeignet, da eine Verbreiterung der Resonanzlinien entsprechend der Felddifferenz über die maximale Ausdehnung der Probe eintritt. Die Grenze liegt bei Feldinhomo-

genitäten, bei denen diese Differenz über die Probe von der Größenordnung der durch die Gitterwechselwirkung verursachten natürlichen Linienbreite ist.

f) Peaking Strips

Bringt man einen Draht aus einem Material mit sehr steiler, nahezu rechteckiger Magnetisierungskurve mit möglichst kleiner Koerzitivkraft in ein veränderliches Feld (Drahtachse parallel B), so wird die Magnetisierung im Dreht ihr Vorzeichen praktisch beim Nulldurchgang des Feldes umkehren. Eine Induktionsspule, die um den Draht gewickelt wird, gibt also ein Spannungssignal im Augenblick des Nulldurchgangs (genauer gesagt, liegt die Spannungskurve symmetrisch um die Koerzitivkraft  $H = H_0$ , nicht um  $H = 0$ , was bei exakten Messungen zu berücksichtigen ist; das Vorzeichen dieser Korrektur hängt von der Richtung von  $\dot{B}$  ab).

Erzeugt man jetzt durch eine zweite Spule ein bekanntes Gegenfeld der Größe  $H_0$ , welches dem ursprünglichen zu messenden Feld entgegengerichtet ist, so erhält man ein Signal im Augenblick des Durchganges von H durch  $H_0$ . Damit ist die Magnetfeldmessung wieder auf die Messung eines Stromes zurückgeführt. Die Methode ist normalerweise anwendbar bei kleinen Feldstärken bis zu ca.  $100\Gamma$ , bei einigem Aufwand an Kühlung der Gegenfeldspule ist es möglich, bis zu ca.  $1000\Gamma$  zu messen. Ihr Hauptanwendungsgebiet liegt jedoch bei kleinen Feldstärken, insbesondere bei schnell veränderlichen Feldern.

### C. Das Genfer Meßprogramm

Aus dem weiter oben Gesagten geht hervor, daß die ideale Ausmessung eines Magneten darin besteht, daß man über dem gesamten Umfang auf verschiedenen, über die Breite der Vakuumkammer verteilten Radien Punkt für Punkt das Magnetfeld sowie seinen Gradienten bei allen vorkommenden Feldstärken durchmißt. Ein solches Programm ist natürlich bei einem Magneten von der Größe des CERN-Magneten (600 m Umfang) praktisch nicht durchzuführen. Man kann nun glücklicherweise zeigen, daß es genügt, wenn der Mittelwert des Feldes über einen Bereich, der klein ist gegen die Betatronwellenlänge, mit dem Sollwert übereinstimmt. Kleinere Schwankungen innerhalb dieses Bereiches beeinflussen das Teilchen in seinem Verhalten nicht merklich. Ähnliches gilt auch für den Gradienten. Der Genfer Magnet besteht nun aus 100 Einheiten, deren jede sich aus jeweils 5 Blocks mit positivem und 5 Blocks mit negativem  $n$  zusammensetzt. Jeder einzelne dieser Blocks hat eine Länge von 418 mm, so daß es, bei einer Betatronwellenlänge von ca. 100 m, genügt, über diese Blocks zu mitteln. Dabei setzt man natürlich voraus, daß es äußerst unwahrscheinlich ist, daß sehr große Schwankungen von  $B$  und  $n$  über kurze Strecken von der Größenordnung cm auftreten. Davon muß man sich durch Punktmessungen an den Modellen überzeugen, was in Genf auch geschehen ist.

Das einzige Meßgerät, welches diese Mittelung automatisch durchführt, ist naturgemäß die feststehende Induktionsspule mit anschließendem elektronischen Integrator. Da es außerdem auch bei der nötigen Sorgfalt im mechanischen und elektrischen Aufbau alle Anforderungen erfüllt, die an die Genauigkeit der Messungen zu stellen sind, wurde in Genf fast nur damit gemessen. Der Nachteil, daß man nur das dynamische Feld messen kann, fällt nicht wesentlich ins Gewicht, da Empfindlichkeit und Genauigkeit so groß sind, daß es auch möglich ist, das remanente Feld mit der gleichen Vorrichtung zu untersuchen. Es sollen daher im folgenden sowohl die einzelnen Teile der Meßvorrichtung als auch ihre Anwendung auf die Messungen und ihre mechanische Montage beschrieben werden.

## I. Praxis der Messungen

Bei physikalischen Messungen erreicht man die größte Empfindlichkeit und Genauigkeit bei Anwendung von Kompensationsverfahren, bei denen das anzeigende Meßinstrument nur als Nullinstrument verwendet wird und daher sehr empfindlich sein kann. Auch im Falle der Magnetfeldmessungen ist es zweckmäßig, in möglichst vielen Fällen solche Nullmethoden zu verwenden.

Für alle Messungen werden Spulen bekannter Windungsfläche benötigt. Ihre geometrische Ausdehnung richtet sich nach der vorgesehenen Messung. Für Einzelausmessung der Modelle wird man Spulen geringer räumlicher Ausdehnung verwenden, während für die serienmäßige Vermessung der Blocks Spulen mit rechteckigem Querschnitt von ca. 40 cm Länge benutzt werden. Auf die Spulenherstellung wird in einem besonderen Abschnitt eingegangen werden.

Die im folgenden beschriebenen Schaltungen sind sowohl für Punktmessungen (kleine Spulen) als auch für Mittelwertmessungen über einen Block (lange Spulen) geeignet, und es besteht kein prinzipieller Unterschied.

### a) Messungen des Gradienten

- 1) Der Absolutwert des Gradienten am Sollkreis bei verschiedenem  $B_0$
- 2) Der Gradient als Funktion des Radius (n-Plateau) bei verschiedenen Feldern

#### 1) $n = n(B_0)$

Zwei Spulen mit gleicher Windungsfläche  $F$  werden beiderseits des Sollkreises im Abstand  $\frac{d}{2}$  montiert (Abb. 2). Bei einem Feldverlauf nach (1) findet man in Spule 1 ein Feld

$$B_1 = B_0 \left( 1 + \frac{nd}{2\varrho_0} \right)$$

und in Spule 2

$$B_2 = B_0 \left( 1 - \frac{nd}{2\varrho_0} \right)$$

Im veränderlichen Feld werden die Spannungen  $F \frac{dB_1}{dt}$  bzw.  $F \frac{dB_2}{dt}$  induziert.

Man greift jetzt von der Spule mit der größeren Spannung mittels eines Spannungsteilers  $R_1$  einen Bruchteil  $K$  ab und gibt die Differenz dieser beiden Spannungen auf den Eingang eines elektronischen Integrators (Abb. 3). Der Widerstand  $R_2$ , der parallel zu  $L_2$  liegt, dient dazu, die zweite Spule in gleicher Weise zu belasten wie  $L_1$ . Ist  $RC = \tau$  die Kopplungszeitkonstante des Integrators, so ist die Spannung an seinem Ausgang

$$E = \frac{FB_0}{RC} \left[ K \left( 1 + \frac{nd}{2\varphi_0} \right) - \left( 1 - \frac{nd}{2\varphi_0} \right) \right] \quad (8)$$

In einem idealen Magneten ließe sich nun ein Wert  $K$  finden, bei dem  $E$  für alle  $B_0$  verschwindet. Dann wäre  $n$  unabhängig von  $B_0$ . Infolge der Veränderlichkeit der Permeabilität des Eisens, die sich überdies noch bei verschiedenen Radien verschieden auswirkt, ist auch  $n$  eine Funktion von  $B_0$ . Man kann also  $K$  nur für einen bestimmten Wert von  $B_0$  so einstellen, daß  $E$  verschwindet, und erhält dann

$$n(B_0) = \frac{1 - K(B_0)}{1 + K(B_0)} \frac{2\varphi_0}{d} \quad (9)$$

Fehlerquellen der  $n$ -Messung sind:

α) Differenz in den Windungsflächen ( $< 2 \cdot 10^{-5}$ )

β) Linearität des Spannungsteilers

Der Spannungsteiler besteht aus einem Dekadenwiderstand, dessen einzelne Dekaden je auf 1 %o linear sind. Da bei Vergleichsmessungen in dem in Frage kommenden Bereich die beiden ersten Dekaden nicht verändert werden, läßt sich  $K$  relativ mit einem Fehler von  $10^{-5}$ , absolut auf  $10^{-3}$  bestimmen. Im Bedarfsfalle kann der Widerstand für größere Genauigkeit mit Normalwiderständen verglichen und geeicht werden.

γ) Der Integrator

Die in dieser Weise durchgeführten Messungen sind von der Charakteristik des Integrators unabhängig, jedoch werden sehr hohe Anforderungen an die Nullpunktstabilität gestellt. Die Ausgangsspannung des Integrators läßt sich auf  $\pm 0,5$  mV konstant halten, was bei den verwendeten Spulen einem Fehler von etwa  $1/2$  mV entspricht.

δ) Position der Spulen (relativ)

Der Abstand der magnetischen Achsen der Spulen läßt sich (vergleiche Abschnitt Eichen) auf  $0,02$  mm genau bestimmen, was bei  $d = 30$  mm einem Fehler von  $\frac{2}{3} \cdot 10^{-3}$  entspricht.

ε) Position der Spulen (absolut)

Ein Fehler in der Lage der Symmetrielinie zwischen den beiden Spulen, die auf dem Sollkreis liegen muß, wirkt sich, wie man leicht nachrechnen kann, wie ein Fehler in der Messung von  $B_0$  aus. Bei einem relativen Gradienten von  $1/B_0 \cdot dB_0/dr = 4$  % pro cm ergibt das einen Beitrag von  $0,4$  % im n-Fehler, falls sich die Spulen mit einer Genauigkeit von  $0,1$  mm symmetrieren lassen.

Unter Berücksichtigung dieser Fehlerquellen kann der n-Wert mit dieser Anordnung auf  $10^{-3}$  absolut und auf einige  $10^{-4}$  relativ bestimmt werden.

2)  $n = n(r)$

Der Gradient außerhalb des Sollkreises kann gemessen werden, indem man die Spannung der Gradientenspule  $F \frac{d}{dt} (B_1 - B_2)$  vergleicht mit der Spannung einer dritten Spule gleicher Windungsfläche an einer beliebigen Stelle des Feldes (Abb. 4). Man macht durch Verstellen die Differenz

$$K \frac{B_{\text{ref}} F}{RC} = \frac{\Delta B F}{RC} = 0 \quad (10)$$

und erhält daraus

$$n = K \frac{f_0}{d} \frac{B_{\text{ref}}}{B_0} \quad (11)$$

Die Kurve  $K(r)$  unterscheidet sich von  $n(r)$  nur durch einen konstanten Faktor, der aus der Messung für  $r = 0$  am Sollkreis ermittelt werden kann.

Der relative Fehler dieser Kurve beträgt  $5 \cdot 10^{-4}$  bei  $150 \text{ r}$  und  $10^{-4}$  bei  $5000 \text{ r}$ .

b) Messung des Sollkreisfeldes  $B_0 = B_0(I)$  als Funktion des Erregerstroms

Diese Messung ist gleichbedeutend (bis auf den Maßstab) mit der Aufnahme der Magnetisierungskurve. Um hier eine Nullmethode anwenden zu können, muß man eine dem Strom proportionale Spannung erzeugen. Dies geschieht am einfachsten vermittelt eines mit der Magnetspule in Serie liegenden, genau bekannten Widerstandes  $R_s$  (Abb. 5). Über den Spannungsteiler  $R_1, R_2$  schaltet man die beiden Spannungen  $\frac{B_0^F}{RC}$  (vom Integratorausgang und  $I R_s$  gegeneinander und reguliert  $R_1$  und  $R_2$  so ein, daß für vorgegebene Werte des Stromes  $I_V$  das Signal vom Punkt A gegen Erde verschwindet. Aus

$$E_A = \frac{R_2 \frac{B_{0V}^F}{RC} - I_V R_2 R_1}{R_1 + R_2} = 0 \quad (12)$$

erhält man das zum jeweiligen Strom  $I$  gehörige Feld  $B_0$ .

Der Widerstand  $R_s$  wurde mittels einer Kelvin'schen Doppelbrücke genau vermessen. Der absolute Fehler der Feldmessung beträgt  $1 \text{ r}$  bei kleinen Feldern, bei größeren Feldern  $2 \text{ ‰}$ .

Bei dieser Art der Messung ist man natürlich nicht mehr unabhängig von der Charakteristik des Integrators, dessen Abweichung von der Linearität maximal  $1 \text{ ‰}$  beträgt. Eine Variante dieser Messung, die unabhängig vom Integrator

arbeitet, besteht darin, daß man anstatt des Widerstandes  $R_s$  einen Lufttransformator mit der Gegeninduktivität  $M$  vom Magnetisierungsstrom durchfließen läßt (Abb.6). Man schaltet wieder einen Bruchteil  $K$  der Induktionsspannung der Spule am Sollkreis gegen die Spannung  $M \frac{dI}{dt}$ , gibt diese Differenz auf den Integratoreingang und wählt  $K$  so, daß die Ausgangsspannung am Integrator verschwindet:

$$\frac{K}{R} \frac{F}{C} B_0 - \frac{M}{R} \frac{C}{C} I = 0 \quad (13)$$

Bei bekanntem Verhältnis  $M/F$  läßt sich daraus  $B_0$  berechnen.

Sowohl bei den Gradientenmessungen als auch bei den Feldmessungen ist es erforderlich, einen bestimmten Feldwert festzulegen, für den die betreffende Differenzspannung zu Null werden soll, d.h. also, für den die Messung vorgenommen werden soll. Dies geschieht bei CERN vermittelt eines Stromdiskriminators. Man mißt dabei den Erregerstrom für den Magneten und entnimmt den zugehörigen Feldwert aus der gemessenen  $B_0 = B_0(I)$ -Kurve. Sämtliche Messungen erfolgen dann in der Weise, daß die Integratorausgangsspannung auf den Vertikaleingang eines Oszillographen gelegt wird. Die Horizontalablenkung ist dem Magnetisierungsstrom  $I$  proportional. In dem Augenblick, in dem die Spannung an  $R_s$  durch einen bestimmten, durch eine Referenzspannung vorher festgelegten Wert geht, wird der Kathodenstrahl auf der Anzeigeröhre verdunkelt.  $K$  wird dann so gewählt, daß das Ende der Oszillographenspur auf der Null-Linie liegt. Wegen der geringen Wiederholungsfrequenz von  $1/3$  Hz wurde ein Bildspeicheroszillograph (Memoskop) verwendet, der einen einmaligen Vorgang für beliebig lange Zeit auf dem Leuchtschirm erscheinen läßt.

Der Vorwiderstand  $R_s$  besteht aus einer Anzahl parallelgeschalteter, 6 mm starker Mangan<sup>iv</sup>drähte, die sich in

einem wasserdurchflossenen Glasrohr befinden. Bei einem  $I_{\max}$  von  $\sim 6000$  Amp. fällt an  $R_s$  eine Spannung von 5 V ab (50 mV beim Einschußfeld).

c) Messung des remanenten Feldes

Da mit den bisher beschriebenen Methoden nur der dynamische Anteil des Feldes gemessen werden kann, muß das remanente Feld gesondert bestimmt werden. Das läßt sich bei Verwendung einer Spule entsprechend hoher Windungsfläche mit dem gleichen Integrator durchführen, falls die Zeitkonstante des letzteren groß und die Drift klein genug ist. Bei dem in Genf verwendeten Integrator betrug die Drift ungefähr  $1 \mu\text{V}/\text{sec}$  RC am Eingang. Dies entspricht ca. 100 Maxwell/sec. Mit einer Spule von 40 cm Länge und 2 cm Breite mit 2000 Wd. erhielt man eine Windungsfläche von ungefähr  $16 \text{ m}^2$ . Diese ergab bei einer radialen Verschiebung um 3 cm in einem Feld von 30 r ein Signal von  $7 \cdot 10^5$  Maxwell. Man sieht, daß die Nullpunktverschiebung, selbst über einige Sekunden, einen Fehler von weniger als einem Promill verursacht. Die Messung der Ausgangsspannung erfolgt mit einem automatisch anzeigenden, vierstelligen Digitalvoltmeter mit einer Genauigkeit von ca.  $1/2 \%$ . Da für Punktmessungen des remanenten Feldes die Windungsfläche der Spulen sehr klein wird, wurde in einigen Fällen eine rotierende Spule verwendet.

d) Bestimmung der Mittelebene

Eine absolute Messung der Lage der Mittelebene setzt eine sehr genaue mechanische Justiervorrichtung voraus, die es gestattet, eine Spule mit ihrer Achse in der geometrischen Symmetrieebene parallel zum Radius zu justieren. Man mißt dann die in der Spule durch die Horizontalkomponente des Feldes induzierte Spannung, die verschwinden muß, falls magnetische und mechanische Symmetrieebene zusammenfallen.

Einfacher ist eine Relativmessung: Man bringt auf dem Spulen-

körper zusätzlich einige wenige Windungen senkrecht zu der Hauptwicklung an, in denen eine Spannung von der Vertikalkomponente induziert wird. Einen Teil davon schaltet man gegen die Spannung der Hauptwicklung (Horizontalkomponente) und gibt die Differenz wieder auf den Integrator. Die Meßspule wird ungefähr in die Mittelebene gebracht und bei einer bestimmten Feldstärke (man wählt 5000 r, weil da  $\mu$  maximal und der Fehler infolgedessen minimal ist) das Signal in üblicher Weise auf Null gestellt. Dieser Einstellung entspricht ein bestimmtes Verhältnis der Magnetfeldkomponenten in den Richtungen der beiden Spulenachsen, und damit ein bestimmter Winkel zwischen der Ebene durch die Achse der Hauptspule senkrecht zur Hilfsspule und der Mittelebene des Feldes. Eine Änderung dieses Winkels muß durch eine Veränderung im Abgriff ausgeglichen werden, und aus dieser Änderung läßt sich die Drehung der Ebene bei anderen Feldstärken berechnen. Es zeigte sich bei den CERN-Messungen, daß die Drehung der Feldlinienrichtung bei allen Feldstärken - also bei einer Änderung der Permeabilität um etwa eine Zehnerpotenz - stets weniger als  $10^{-3}$  rad betrug.

## II. Meßmaschinen

Ein sehr wichtiges Problem bei der praktischen Anwendung der im Vorhergehenden beschriebenen Geräte ist die Frage der zweckmäßigen Montage der Spulen. Sie muß so ausgeführt sein, daß die Spulen relativ zum Magneten innerhalb des Spaltes meßbar verschoben werden können. Für die Messungen an den einzelnen Modellen wurde ein auf Schienen laufender Support üblicher Bauart verwendet. Für die Kontrollmessungen an den 1000 Einzelblocks wurde eine Blockmeßmaschine konstruiert, die es gestattete, sämtliche Blocks unter gleichen Bedingungen zu untersuchen.

Bei diesen Messungen kann man glücklicherweise auf Absolutmessungen verzichten. Man vergleicht jeden einzelnen Block mit einem Referenzblock, indem man bei  $B_0$ -Messungen in je-

den Block je eine Spule, bei Gradientenmessungen je ein Spulenpaar in gleiche Position bringt und die Spannungen des einen Blocks gegen die des anderen schaltet. Die Differenz der Spannungen wird in üblicher Weise auf den Eingang des Integrators gegeben und mit Hilfe des Spannungsteilers so abgeglichen, daß die Integratorausgangsspannung bei der zu messenden Feldstärke verschwindet. Der Bruchteil  $K$  des Spannungsteilers ist dann ein Maß für die Differenz der Feldwerte in Referenz- und Prüfblock.

Prüf- und Referenzblock stehen beide wiederum zwischen zwei weiteren Blocks, die den Feldabfall am Rand kompensieren. Die Blockmeßmaschine enthält also insgesamt vier Blocks, die von einer gemeinsamen, seitwärts ausfahrbaren Spule erregt werden. Der jeweilige Prüfblock wird auf einem hydraulisch bewegten Schlitten in seine Position gefahren und mit Hilfe einer oben aufsetzbaren Lehre mit einer Genauigkeit von 0,1 mm nach Höhe, Neigung und radialer Position justiert.

Die Meßspulen befinden sich in einem gläsernen Support, der an einem Schlitten aus V2A befestigt ist. Dieser Schlitten läuft auf den Kanten einer Bettung (ebenfalls V2A) und kann mittels einer Zahnstange und eines Dornes in seiner jeweiligen radialen Position mit einer Genauigkeit von 0,01 mm festgehalten werden. Die Bewegung des Schlittens sowie die Verstellung des Dornes geschieht mittels Preßluft.

Zur Prüfung eines Blocks werden die folgenden Messungen vorgenommen:

- a) Differenz der dynamischen Felder  $B_{\text{ref}} - B_{\text{test}}$  für  $r = 0$  bei acht verschiedenen Sollkreisfeldstärken zwischen  $B_0 = 55 \text{ T}$  und  $B_0 = 14 \text{ 175 T}$ .
- b) Differenz der Gradienten des dynamischen Feldes  $\text{grad } B_{\text{ref}} - \text{grad } B_{\text{test}}$  bei den gleichen Feldstärken wie unter a), jedoch außer für  $r = 0$  noch für  $r = \pm 4,5 \text{ cm}$ . Die Gradienten haben einen Abstand von 3 cm, jede einzelne Spule ist 1,5 cm breit. Die radialen Meßpunkte

wurden so gewählt, daß sich die von den Gradientenspulen in ihren jeweiligen Positionen erfaßten Feldbereiche unmittelbar aneinander anschließen und die gesamte radiale Ausdehnung der Vakuumkammer überdecken. An einem Modell wurde untersucht, ob die Genauigkeit der Gradientenmessung mit einem so großen Spulenabstand ausreicht. Die Messung mit einem Spulenpaar im Abstand von 1,1 cm ergab einen Fehler von der Größe 1 ‰, der sich nur am Rande bemerkbar machte (Abb. 7).

- c) Differenz der remanenten Felder  $(B_{rem})_{ref} - (B_{rem})_{test}$  für  $r = 0$ . Hierbei wurden Spulen größerer Windungsfläche verwendet und von ihrer Position am Sollkreis ganz aus den Magneten entfernt. Die Ausgangsspannung am Integrator wurde mit einem Digitalvoltmeter gemessen.
- d) Differenz der Gradienten des remanenten Feldes  $(grad B_{rem})_{ref} = (grad B_{rem})_{test}$  für  $r = 0$ . Hierzu wurden die gleichen Spulen wie für c) benutzt. Sie wurden mechanisch durch Verschieben des Supports aus der Position  $r = + 1,5$  cm nach  $r = - 1,5$  cm verstellt und die Differenz des Zeitintegrals der Spannungen mit dem Digitalvoltmeter gemessen.
- e) Der Absolutwert des remanenten Feldes des Referenzblocks am Sollkreis wurde zur Kontrolle bestimmt, indem man die Meßspule aus der Position am Sollkreis ganz aus dem Spalt entfernt und wiederum mit dem Voltmeter die Spannung am Integratorausgang gemessen hat.
- f) Lage der Mittelebene im Referenzblock  $ME_{ref}$  bei  $B_0 = 6000$ .
- g) Differenz der durch die ME-Spulen gemessenen Feldkomponenten  $ME_{ref} - ME_{test}$  bei  $6000 \text{ G}$  und bei  $14\,175 \text{ G}$  sowie beim remanenten Feld.

Bei den ersten 350 Blocks bei CERN betrugen die Abweichungen der dynamischen Feldgrößen weniger als 1 ‰. Das remanente Feld am Sollkreis schwankte um maximal  $\pm 150 \text{ mG}$ , was bei

einem Einschußfeld von ca.  $150 \Gamma$  einem Fehler desselben von ca. 1 % entspricht.

In ähnlicher Weise wie die Blocks werden die fertigen Magneteeinheiten, bestehend aus je 10 Blocks, mit einer Referenzeinheit verglichen. Zu diesem Zweck wurde eine Einheitenmeßmaschine konstruiert, auf die aber, da sie nichts wesentlich Neues bringt, nicht näher eingegangen werden soll.

### III. Spulenbau und Eichung

Beim Bau der Spulen muß besonders großer Wert auf mechanische Präzision und Stabilität gelegt werden. Als Wicklungsträger dienten Glasstäbe mit einer Länge von 40 cm und einem Querschnitt von  $1,5 \times 2,0 \text{ cm}^2$ . Spulenachse war die Normale der Seite  $1,5 \times 40 \text{ cm}^2$ . Die Glaskörper ließen sich mit einer Genauigkeit von 0,01 mm auf die vorgeschriebenen Maße schleifen und verändern sich später praktisch nicht mehr. Zum Bewickeln wurde 0,1 mm Thermofix-Draht verwendet. Dies ist ein Draht mit zwei verschiedenen Isolierschichten, deren äußere bei einer Temperatur von ca.  $100^\circ \text{ C}$  plastisch wird. Auf diese Weise ist ein einfaches Verkitten der Windungen untereinander möglich.

Die fertigen Einzelspulen werden in einem Gleichfeld von ca.  $6000 \Gamma$ , das mittels Protonenresonanzen und Shims auf einige  $10^{-4}$  homogenisiert wurde, mit einer geometrisch sehr genau vermessbaren, auf einen keramischen Rahmen aufgebrachten Spule verglichen. Zu diesem Zweck wird die zu messende Spule koaxial in dem Rahmen der Keramikspule befestigt, und beide Spulen werden gemeinsam um  $180^\circ$  kommutiert. Mittels eines Spannungsteilers können dann wieder beide Spannungen aufeinander abgeglichen werden. Es ist so möglich, die Windungsfläche mit einer Genauigkeit von etwa  $10^{-4}$  absolut zu eichen.

Ähnlich geht man vor beim Vergleich zweier Meßspulen miteinander. Man befestigt sie symmetrisch beiderseits der Rotationsachse, so daß sie nach einer Kommutation um  $180^\circ$

ihre Plätze vertauscht haben. Schaltet man ihre Spannungen gegeneinander und gibt die Differenz auf den Integrator, so darf bei Gleichheit der Windungsflächen nach der Kommutation keine Spannung am Integratorausgang nachweisbar sein. Mittels einer festkittbaren zusätzlichen Drahtschleife auf der oberen Seite der Spulen war es möglich, einen Satz von Meßspulen herzustellen, deren Windungsflächen auf 1 bis  $2 \cdot 10^{-5}$  untereinander gleich waren (die Feldinhomogenitäten des Eichmagneten spielen hierbei keine Rolle, da die Plätze der Spulen vertauscht werden, und so jede Spule den gleichen Inhomogenitäten ausgesetzt ist).

Zur Gradientenmessung werden je zwei dieser Spulen auf eine Glasplatte gekittet. Die Messung des Abstandes erfolgt in einem durch Luftspulen erzeugten Vierpolfeld. Auf der Symmetrieachse dieses Feldes verschwindet die Feldstärke. Man bringt beide Spulen nacheinander in eine Stellung, bei der die in ihnen durch das von Wechselstrom erregte Vierpolfeld induzierte Spannung verschwindet. Eine entsprechende mechanische Konstruktion gestattet es, die Verschiebung der beiden Spulen auf 0,02 mm genau zu bestimmen und abzulesen.

#### D. Vorschläge für DESY

Der Hauptunterschied zwischen dem CERN-Magneten und dem geplanten DESY-Magneten besteht in der Wiederholungsperiode. Während in Genf das Feld in einer Zeit von ca. 1 sec hochgefahren wird, soll der Hamburger Magnet mit 50 Hz betrieben werden. Die dadurch auftretenden Probleme wirken sich jedoch weniger auf die Meßtechnik als vielmehr auf die Konstruktion des Magneten selbst aus. Die durch erhöhte Wirbelströme auftretenden Feldfehler werden, soweit sie außerhalb der Toleranzen liegen, einfach mitgemessen. Infolgedessen kann auch hierbei eine Induktionsspule mit Integrator zur Messung des dynamischen Feldes benutzt werden.

Wegen der zeitlichen Periodizität des Feldes ist es nicht nötig, ein Memoskop zu verwenden, da man auf einem normalen Oszillographen ein stehendes Bild erhält. Es ist noch zu untersuchen, ob es vernünftig ist, Start und Ende der Integrationsperiode durch einen Stromdiskriminator vorzunehmen. Es wird sicher zweckmäßiger sein, den Start des Integrators beim Nulldurchgang des Feldes durch einen Peaking-Strip vornehmen zu lassen. Bis zu Feldstärken von ca. 100  $\Gamma$  läßt sich auch das Erreichen einer bestimmten Feldstärke (bei CERN Unterdrückung des Strahls) durch einen Peaking-Strip anzeigen. Bei hohen Feldstärken benötigt man wieder einen Stromdiskriminator (s.S.13).

In Modellen können die Punktmessungen bei kleinen Feldstärken bis zu ca. 100  $\Gamma$  mit Peaking-Strips ausgeführt werden. Ebenso wird man zur Messung der remanenten Feldverteilung zweckmäßigerweise auf Peaking-Strips zurückgreifen.

Der einzige kritische Punkt, auf den besondere Sorgfalt zu verwenden ist, liegt in der Erzeugung eines Einschußsignales in dem Augenblick, in welchem das Magnetfeld die Einschußfeldstärke erreicht hat. Bei dem vorgesehenen Projekt soll bei einem Feld von 45  $\Gamma$  eingeschossen werden. Da man den Magneten mit Vormagnetisierung betreibt, ist der zeitliche Feldverlauf gegeben durch

$$B = \frac{B_{\max}}{2} (1 - \cos \omega t) \quad (14)$$

$B_{\max}$  ist das maximale Feld, also etwa  $9000 \text{ r}$ . Daraus errechnet man ein maximales  $\dot{B}$  von  $1,5 \cdot 10^6 \text{ r/sec}$  und ein  $\dot{B}$  im Moment des Einschießens von  $2 \cdot 10^5 \text{ r/sec}$ , falls das Feld im Minimum  $0 \text{ r}$  beträgt. (Den Einschußwert von  $\dot{B}$  erhält man entweder durch Differenzieren von (14) oder nach einer von Hardt angegebenen Näherungsformel

$$\dot{B} = \omega \sqrt{B_{\max} (B - B_{\min})}$$

die für Werte  $B \approx B_{\min} \ll B_{\max}$  gilt.)

Für das Einschießen der Elektronen steht ein bestimmter Zeitraum von ca. einer Mikrosekunde zur Verfügung (s. Anhang). Um diesen Zeitraum möglichst gut ausnutzen zu können, muß sein Beginn nach Möglichkeit auf 10 %, d.h. mit einem zulässigen Fehler von  $10^{-7} \text{ sec}$  festgelegt werden. In dieser Zeit ändert sich das Magnetfeld um  $2 \times 10^{-2} \text{ r}$ . Das bedeutet aber, daß ein Magnetfeld von  $45 \text{ r}$  in  $10^{-7} \text{ sec}$  auf weniger als 0,5 % genau gemessen werden muß.

Es war bekannt, daß bei langsam veränderlichen Feldern solche Genauigkeiten tatsächlich mit Peaking-Strips erreicht und sogar unterschritten werden können. Jedoch bestanden Bedenken, ob diese Eigenschaften der Peaking-Strips auch bei schnell veränderlichen Feldern erhalten bleiben würden. Man sieht nämlich leicht ein, daß, infolge der im Draht induzierten Wirbelströme, die magnetische Erregung  $H$  im Drahtinnern nicht sofort den vollen Wert des zu messenden Feldes annimmt. Es treten Relaxationszeiten von der Größenordnung  $10^{-5} \text{ sec}$  auf, die eine scheinbare Vergrößerung der Koerzitivkraft zur Folge haben. Es lagen nun in Genf Messungen bei Feldänderungsgeschwindigkeiten bis zu  $5 \cdot 10^4 \text{ r/sec}$  vor, aus denen hervorging, daß diese Verzögerungszeiten zwar auftreten, daß sie aber sehr wenig streuen. Die Streuung, d.h. die Unsicherheit, mit der der Einschußimpuls ausgelöst wird, betrug bei der angegebenen Feldänderungsgeschwindigkeit  $3 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$ . Dies entspricht einem Feldfehler von  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ r}$ .

In diesem Zusammenhang wurden auch die Erfahrungen der Synchrotron-Gruppe in Bonn eingeholt. Da der Bonner Magnet praktisch

unter den gleichen Bedingungen betrieben wird wie der Hamburger, können diese Erfahrungen direkt übernommen werden. Es zeigte sich, daß die Peaking-Strips im Bonner Feld mit einer Reproduzierbarkeit von  $1 \cdot 10^{-7}$  arbeiten und infolgedessen für den verlangten Zweck durchaus geeignet sind.

Von Genf wurde außerdem vorgeschlagen, statt Peaking-Strips eine Elektronenresonanzanordnung zu verwenden. Es sollte möglich sein, das Einschuß-Feld mit einer Genauigkeit von  $10^{-2} r$  (auch im inhomogenen Feld!) zu messen. Bei Verwendung von Diphenil-Picryl-Hydrazil als empfindlicher Substanz mit einer Relaxationszeit  $T_2 = 4 \cdot 10^{-8}$  sec könnte man noch dynamische Felder mit Änderungsgeschwindigkeiten bis zu  $5 \cdot 10^7 r/sec$  messen.

Dieser Bericht wurde im Anschluß an einen vierwöchigen Studienaufenthalt in Genf zusammengestellt. Es fanden Diskussionen mit der CERN-PS-Magnetgruppe, der Synchrotron-Gruppe in Bonn, sowie den Herren Dr. Hardt und Dr. Wüster in Hamburg statt.

E. Anhang

I. Die Einschubzeit

In einem  $W, t$ -Diagramm (Abb. 8) kann man die Gleichgewichtsenergie auf dem Sollkreis in der Umgebung der Einschubenergie durch eine Gerade annähern. Die Steigung  $\dot{W}$  dieser Geraden ist für relativistische Teilchen proportional  $\dot{B}$ . Für eine um die Strecke  $b$  weiter außen verlaufende Bahn ist die zugehörige Gleichgewichtsenergie höher, die entsprechende Gerade verläuft also im Diagramm über der des Sollkreises, während das Umgekehrte für eine innere Bahn gilt.

Jetzt werden von einem Linearbeschleuniger Elektronen der Energie  $W_i \pm \delta W_i$  angeboten. Zur Zeit  $t = t_0$  können auf dem äußeren Radius Elektronen der Energie  $W_i - \delta W_i$  eingefangen werden (natürlich vorausgesetzt, daß sie die richtige Phase haben). Zur Zeit  $t = t_1$  werden auf der äußeren Bahn die Elektronen mit der größten Energie  $W_i + \delta W_i$ , alle anderen auf inneren Bahnen eingefangen. Zwischen  $t_1$  und  $t_2$  können alle Teilchen, die innerhalb des Bereiches  $W_i \pm \delta W_i$  liegen, eingefangen werden. In  $t_2$  ist die Gleichgewichtsbahn für Teilchen mit geringerer Energie bereits nach innen abgewandert, bei  $t_3$  auch die für Teilchen der höchsten Energie.  $t_2 - t_1$  ist also die Zeit, während der alle vom Linac gelieferten Teilchen eingefangen werden können. Innerhalb dieser Zeit muß nach Möglichkeit eingeschossen werden.

Aus der Abb. 8 entnimmt man

$$t_1 - t_0 \approx t_3 - t_2 = \frac{2 \delta W_i}{W_i} \quad (\text{A I, 1})$$

ferner ist

$$t_2 - t_0 \approx t_3 - t_1 = \frac{\Delta B(2b)}{\dot{B}} \quad (\text{A I, 2})$$

Dies ist die Zeit, in der der Gleichgewichtskreis um die Strecke  $2b$  in radialer Richtung auswandert. Aus

$$\frac{r}{\rho_0} = \alpha \frac{\Delta B}{B} \quad (\text{A I, 3})$$

erhält man

$$\Delta B(2b) = \frac{B_i}{\alpha} \cdot \frac{2b}{\rho_0} \quad (\text{A I, 4})$$

und damit

$$t_2 - t_0 \approx t_3 - t_1 = \frac{B_i}{\dot{B}_i} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{2b}{\rho_0} \quad (\text{A I, 5})$$

Für 2b ist nun nicht der gesamte Kammerdurchmesser einzusetzen, da die Teilchen um ihre Gleichgewichtsbahn noch Schwingungen ausführen müssen, für die entsprechend Raum zu lassen ist.

Mit den ungefähren Daten des vorgesehenen Hamburger Synchrotrons

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 30 \text{ m} & \alpha &\approx 0,07 \\ B_i &= 45 \text{ r} & W_i &= 40 \text{ MeV} \\ \dot{B}_i &= 2 \cdot 10^5 \text{ r/sec} & 2 \delta W_i &= 1 \% = 0,4 \text{ MeV} \\ 2b &= 3 \text{ cm} = 1/4 \text{ Kammerbreite (sicher zu ungünstig!)} \end{aligned}$$

erhält man, wenn man noch

$$\dot{W} \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{sec}} \right] = 0,9 \dot{B} \left[ \text{r/sec} \right] \quad (\text{A I, 6})$$

einsetzt,

$$\begin{aligned} t_1 - t_0 &= 2,2 \text{ } \mu\text{sec} \\ t_2 - t_0 &= 3,2 \text{ } \mu\text{sec} \end{aligned}$$

woraus sich die zum Einschießen geeignete Zeit  $t_2 - t_1$  zu 1  $\mu\text{sec}$  ergibt.

## II. Schaltung des Integrators und des Stromdiskriminators

Die Abb. 9 und 10 zeigen die Schaltbilder des Integrators und des Stromdiskriminators. Da eine eingehende Beschreibung in Kürze als CERN-Bericht erscheinen wird, kann an dieser Stelle darauf verzichtet werden.

G. Horlitz

$$B = B_0 \left[ 1 + \frac{n}{\varphi_0} r \right]$$

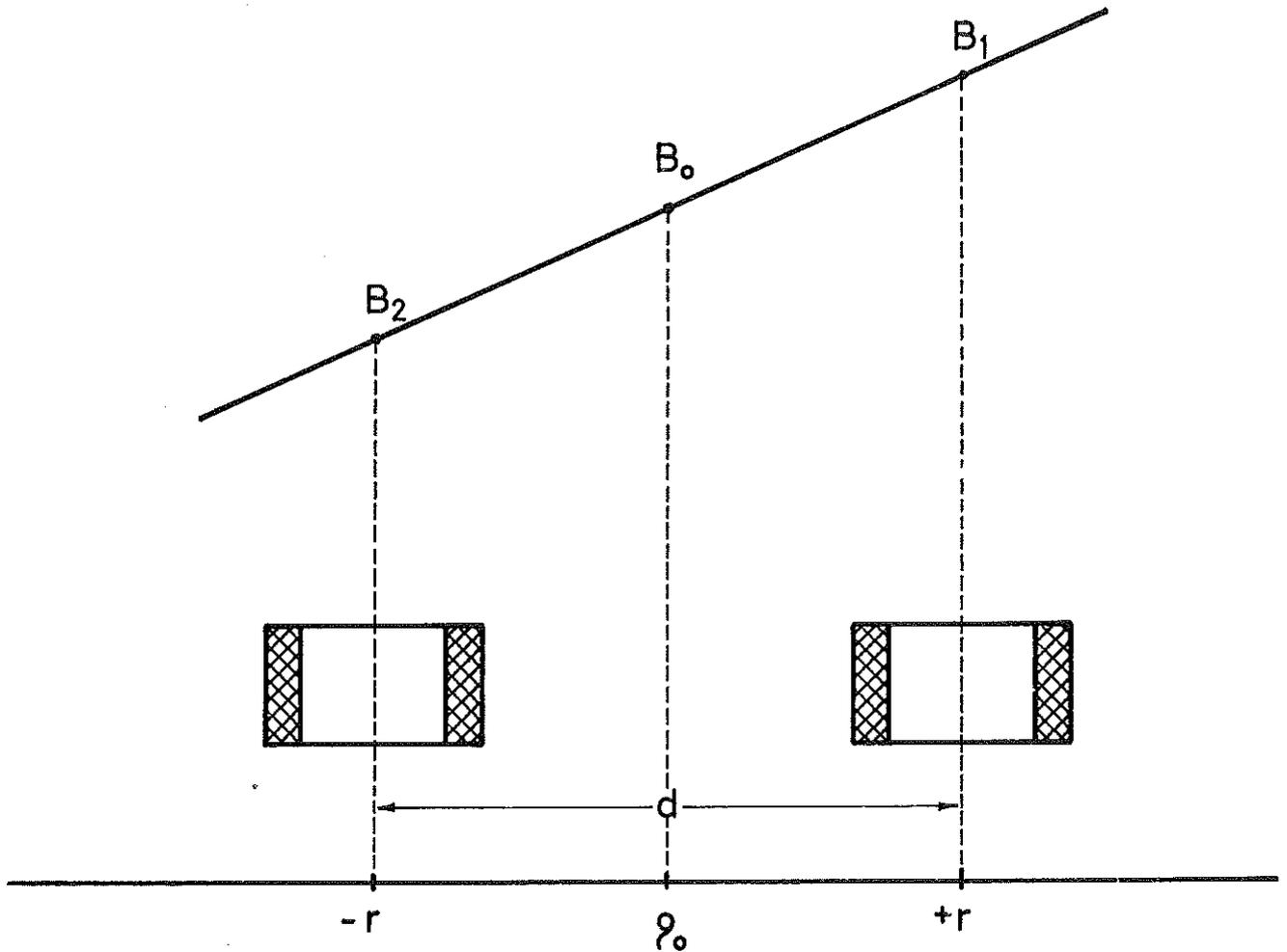
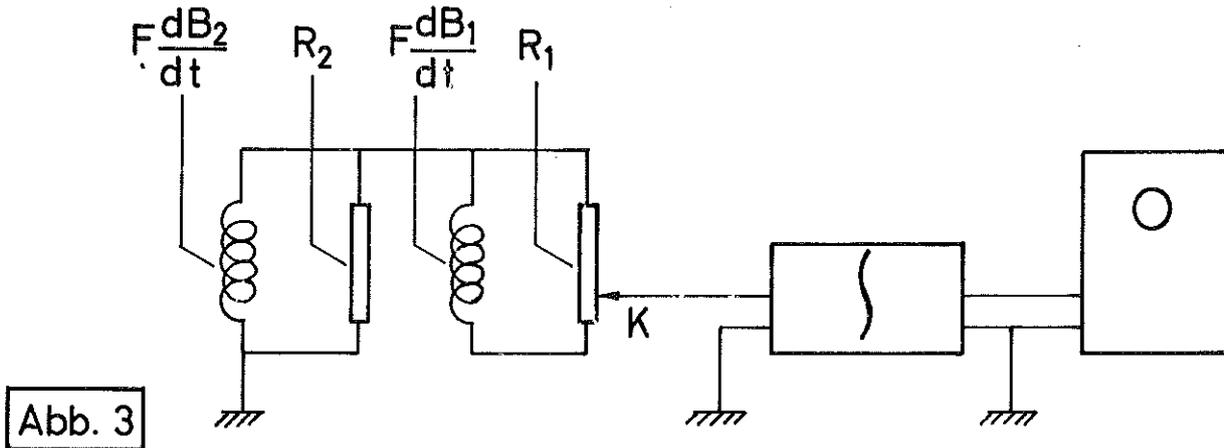


Abb. 2

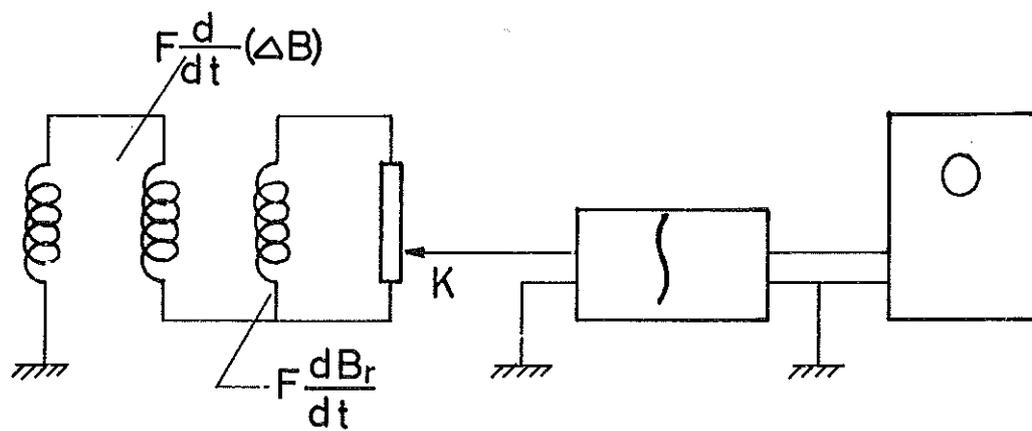
Neue Zeichnung - Nr. 25/1.4

<b>DESY</b>	gez.:	Datum	Name	Gruppe: M1
	gepr.:	2.58	kn	Zchg. No.: 4
	gen.:			Blatt No.: 1
				Ersatz für:
Maßstab:	Anordnung der Gradienten- Spulen für n-Messung am Sollkreis			Ersetzt durch:
				x ausf.:
				ausgef. von:
				Auftrag No.:

### Schaltung für n-Messung am Sollkreis



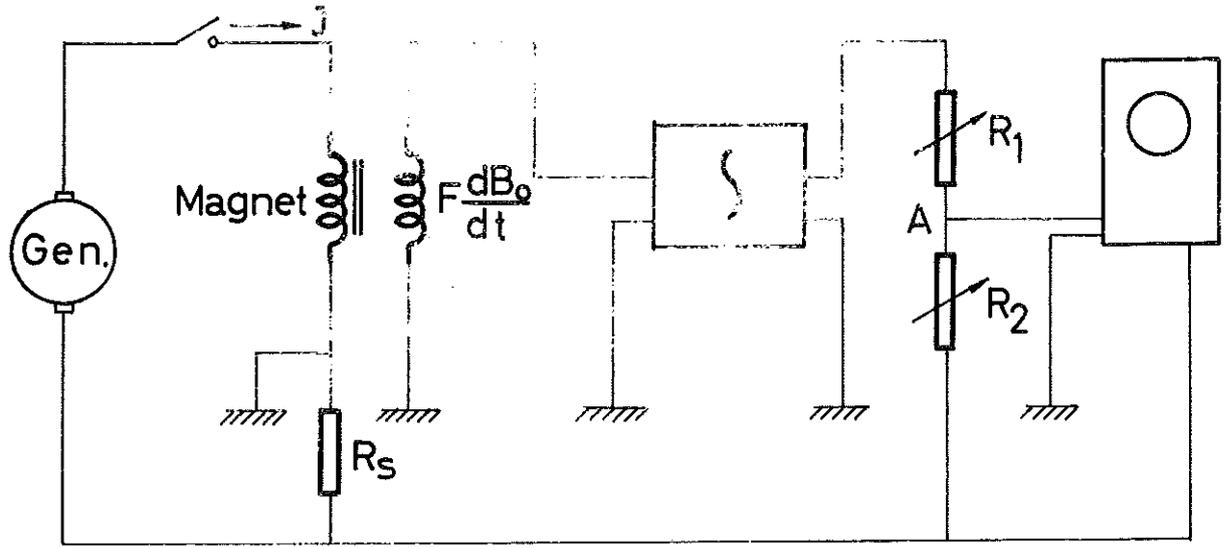
### Schaltung für n(r)-Messungen



*Neue Zeichnung.-Nr. 25/2.4*

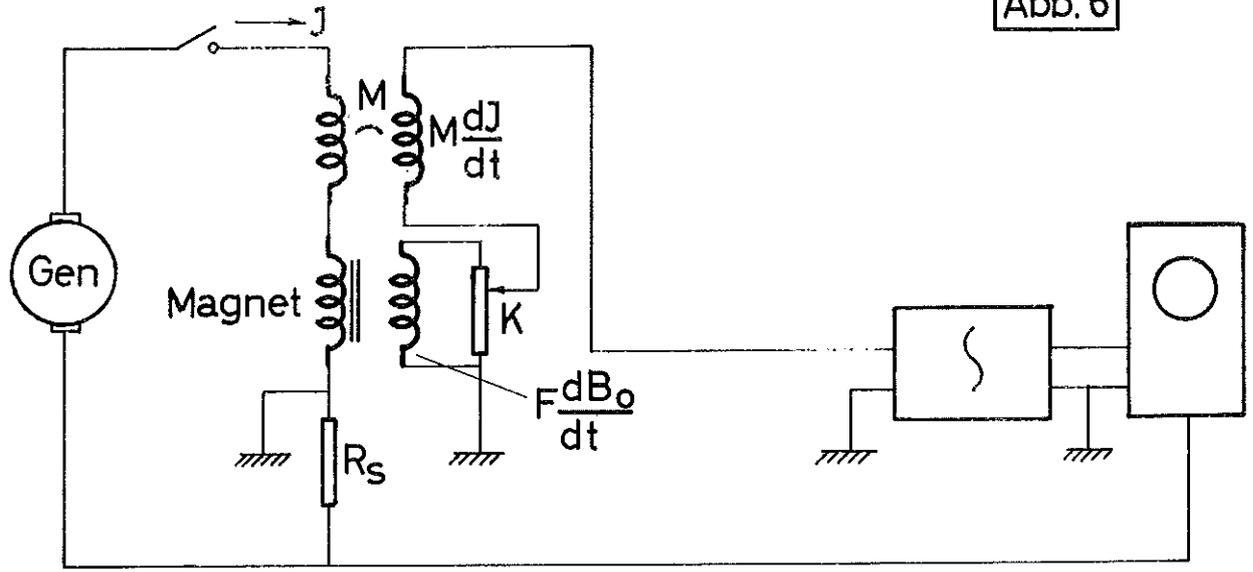
<b>DESY</b>	gez.:	Datum	Name	Gruppe: M1
	gepr.:	2.58	kn	Zchg. No.: 4
	gen.:			Blatt No.: 2
				Ersatz für:
Maßstab:	Schaltungen für Messungen			Ersetzt durch:
				x ausf.:
				ausgef. von:
				Auftrag No.:

Abb. 5



Schaltung für  $B_0 = B_0(J)$ -Messungen mit Vorwiderstand

Abb. 6

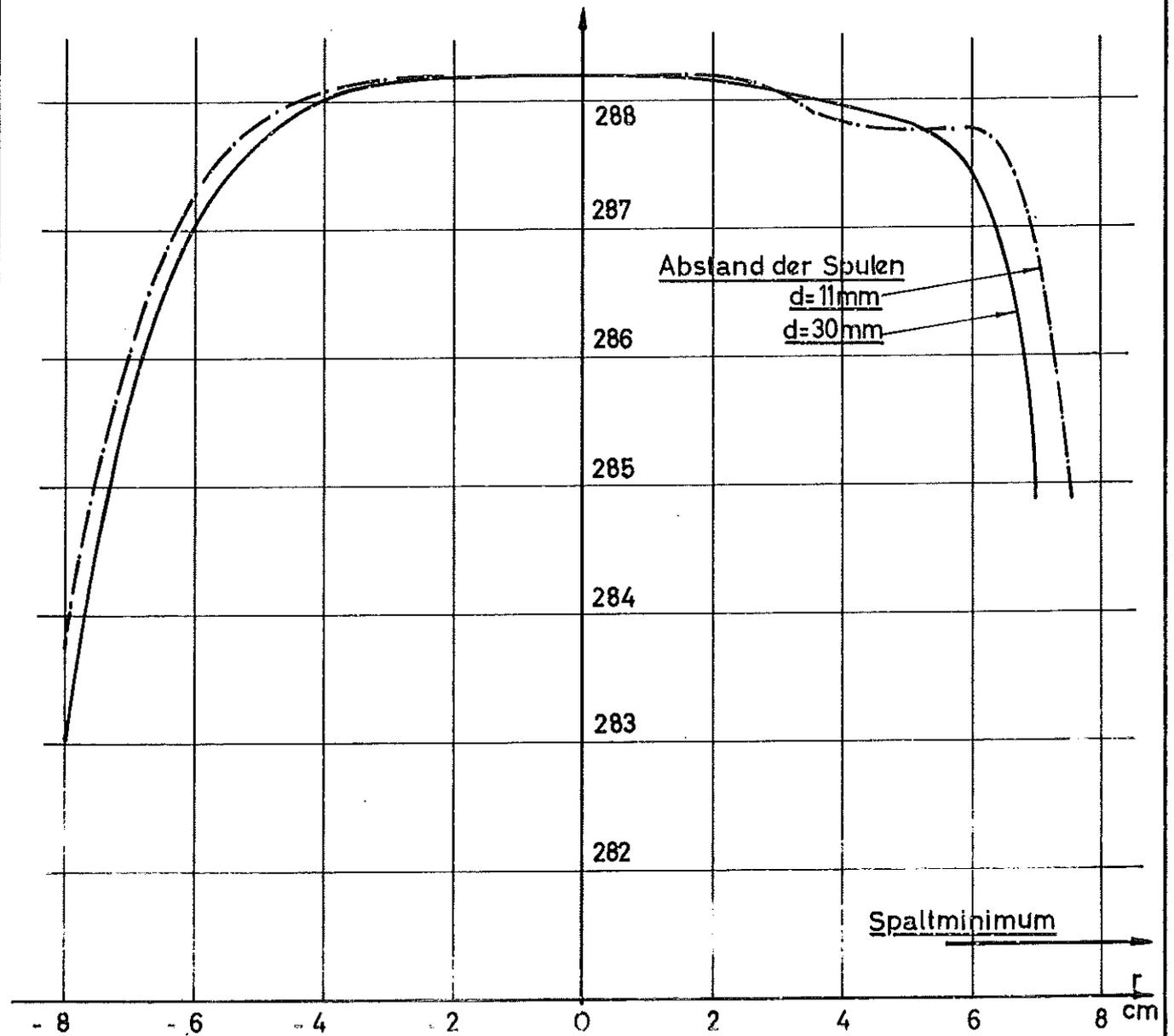


Schaltung für  $B_0 = B_0(J)$ -Messungen mit Gegeninduktivität

Neue Zeichnung.-Nr. 25/3.4

<b>DESY</b>	gez.:	Datum	Name	Gruppe: M1
	gepr.:	2.58	kn	Zchg. No.: 4
	gen.:			Blatt No.: 3
				Ersatz für:
Maßstab:	Schaltungen für $B_0 = B_0(J)$ -Messungen			Ersetzt durch:
				x ausf.:
				ausgef. von:
				Auftrag No.:

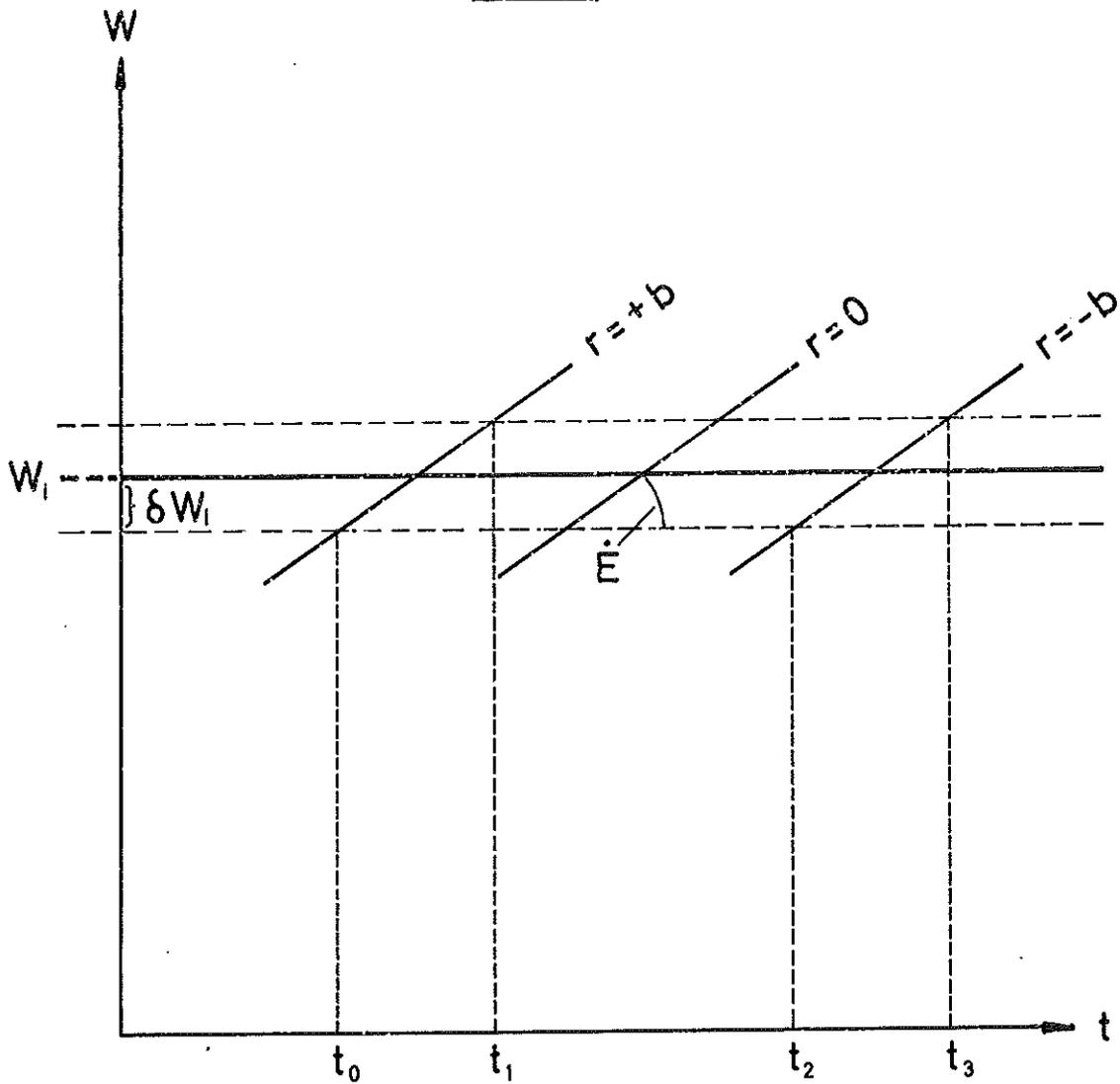
Abb. 7



Neue Zeichnung.-Nr. 25/4.4

<b>DESY</b>	gez.:	Datum	Name	Gruppe: M1
	gepr.:	3.58	kn	Zchg. No.: 4
	gen.:			Blatt No.: 4
				Ersatz für:
Maßstab:	<u><math>n = f(r)</math> bei <math>B_0 = 3 \text{ kGs}</math></u>			Ersetzt durch:
				x ausf.:
				ausgef. von:
(aus CERN-PS-MM int.8)				Auftrag No.:

Abb.8



*Neue Zeichnung. -Nr. 25/5.4*

<b>DESY</b>	gez.:	Datum	Name	Gruppe: <b>M1</b>
	gepr.:	<b>3.58</b>	<b>kn</b>	Zchg. No.: <b>4</b>
	gen.:			Blatt No.: <b>5</b>
				Ersatz für:
Maßstab:	<u><math>W = W(t)</math> in der Umgebung der Injektionsenergie <math>W_i</math> (vergl. Text)</u>			Ersetzt durch:
				x ausf.:
				aufgef. von:
				Auftrag No.:

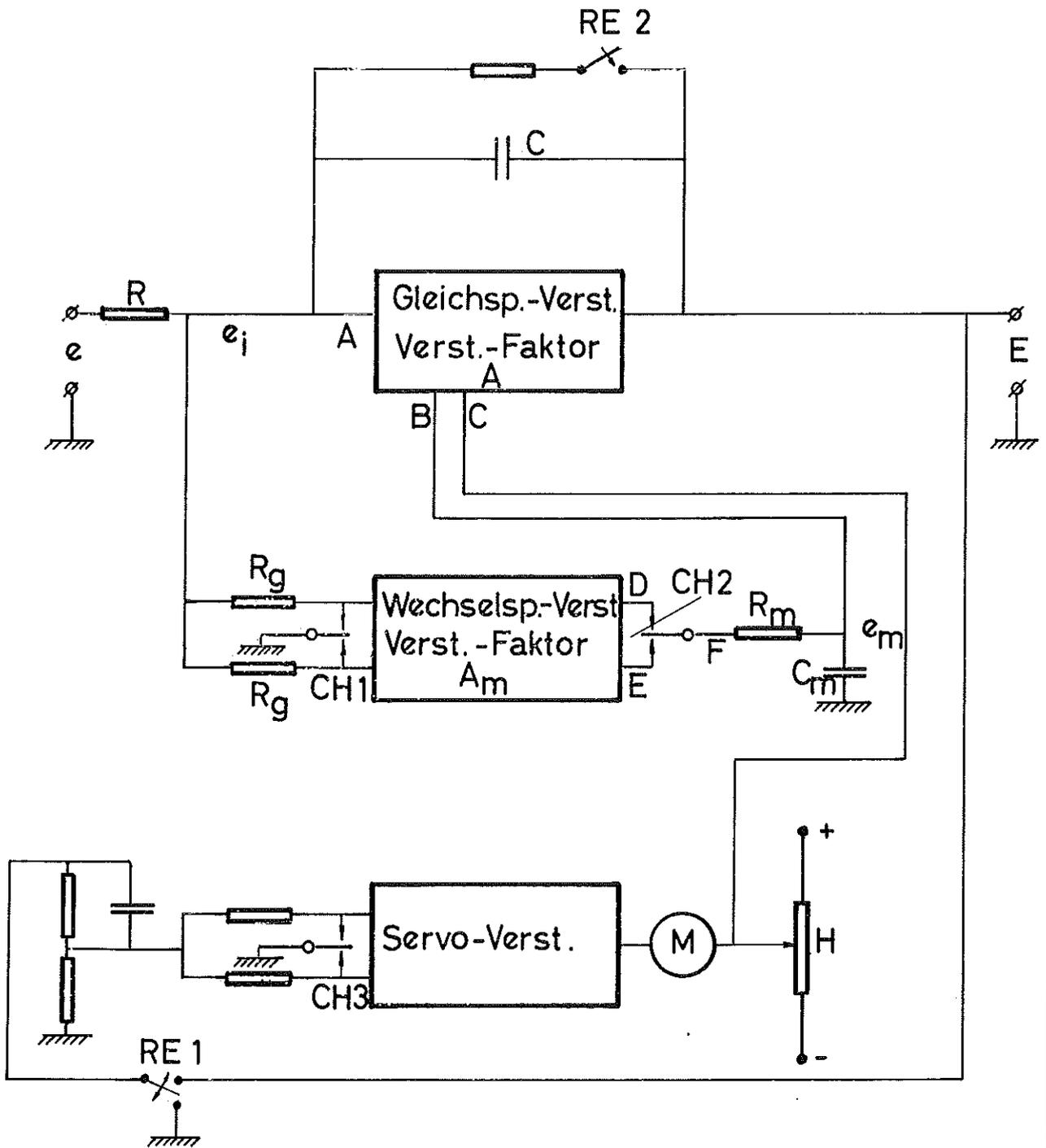


Abb.9

Neue Zeichng.-Nr. 25/6.4

<b>DESY</b>	gez.:	Datum	Name	Gruppe: M1
	gepr.:	3.58	kn	Zchg. No.: 4
	gen.:			Blatt No.: 6
				Ersatz für:
Maßstab:	Integrator mit zerhackerstabilisiertem Eingang und zusätzlicher Driftkorrektur (Blockschema)			Ersetzt durch:
				x ausf.:
				ausgef. von:
				Auftrag No.:



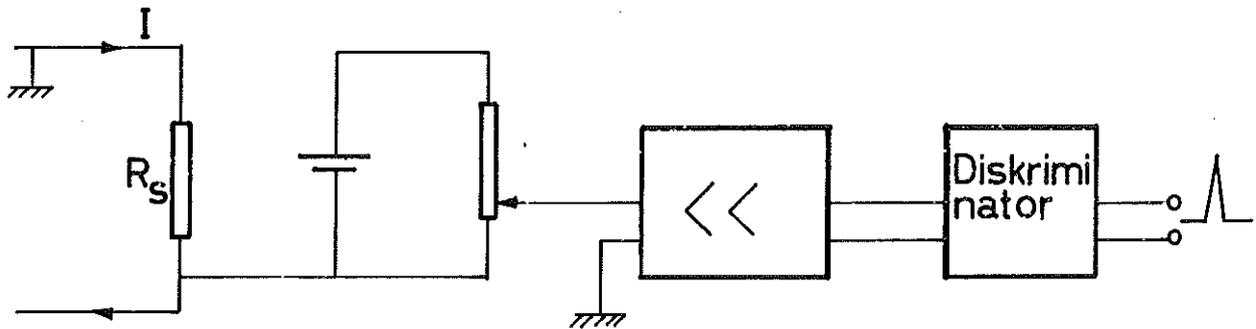


Abb. 11

*Neue Zeichnung.-Nr. 25/7.4*

**DESY**

gez.:	Datum	Name
gepf.:	3.58	kn
gen.:		

Gruppe:	M1
Zchg. No.:	4
Blatt No.:	7
Ersatz für:	
Ersetzt durch:	
x ausf.:	
ausgef. von:	
Auftrag No.:	

Maßstab:

Stromdiskriminator (Blockschema)