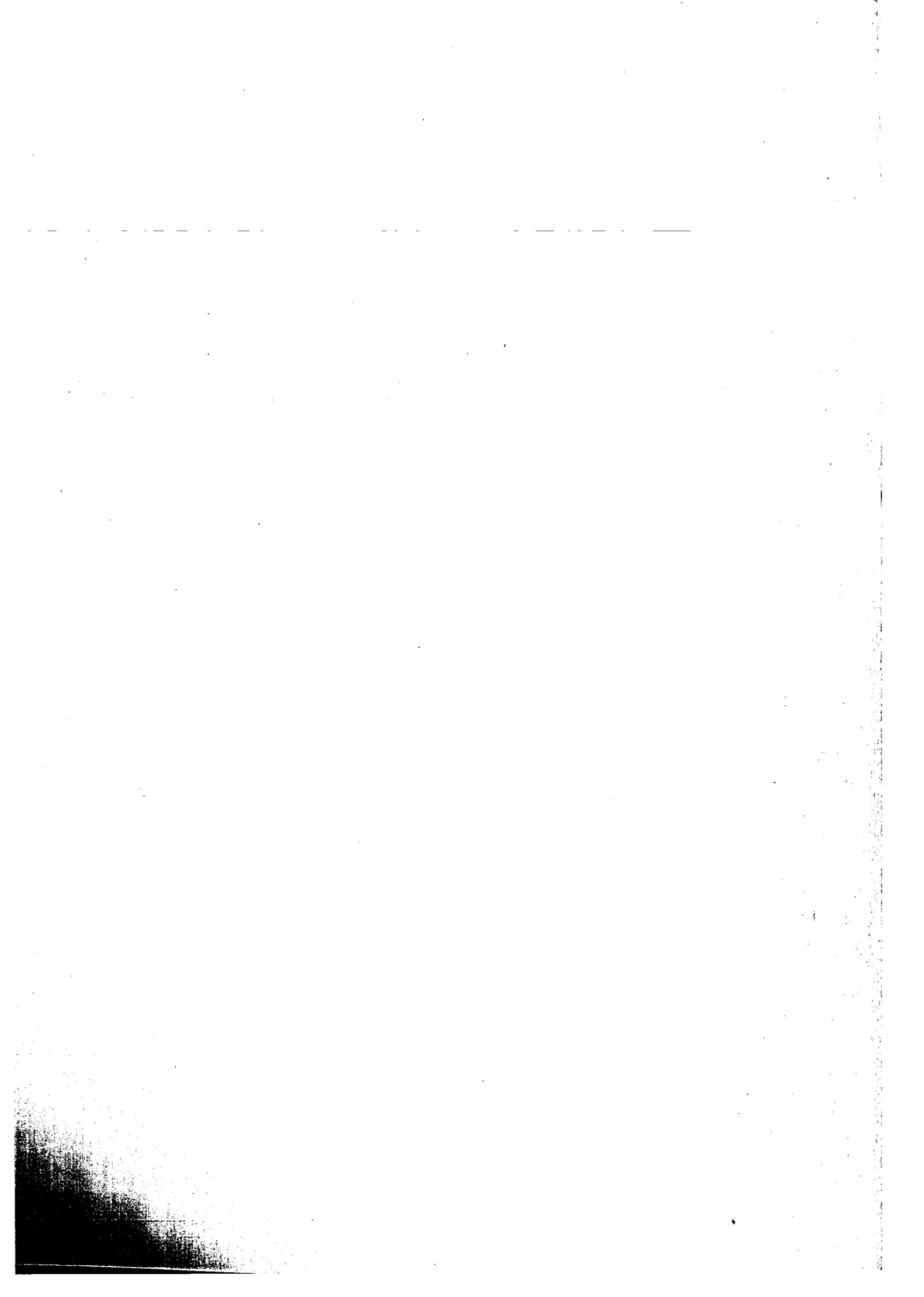


KfK 2632
Januar 1979

Bau und Betrieb zweier supraleitender Quadrupol- Magnete für ein Hyperonen- Experiment im CERN

F. Arendt
Institut für Technische Physik

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Technische Physik

KfK 2632

Bau und Betrieb zweier supraleitender Quadrupol-
Magnete für ein Hyperonen-Experiment im CERN

F. Arendt

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Design and construction of two superconducting quadrupole magnets for a hyperon experiment at CERN

Summary

Two superconducting quadrupoles have been built which are used in the hyperon beam of the CERN SPS. These magnets have a length of 1.35 m resp. 1.05 m and a cold aperture of 36 mm. They provide focussing powers of 180 resp. 130 T/m·m with gradients of 156 T/m. They are installed in the CERN West-Hall below several meters of concrete as a shield against radiation. Design, construction techniques and test results are described. Experiences with the automatic operation of the magnets and their supply system are reported. Almost 5000 hours of operation have been achieved so far without any major failure.

Bau und Betrieb zweier supraleitender Quadrupol-Magnete für ein Hyperonen-Experiment in CERN

Zusammenfassung

Zwei supraleitende Quadrupolmagnete für den Hyperonenstrahl am CERN SPS wurden gebaut. Sie sind 1,35 m bzw. 1,05 m lang und haben eine kalte Öffnung von 36 mm. Bei einem Gradienten von 156 T/m ergeben sich Fokussierstärken von 180 bzw. 130 T/m·m. Die Magnete sind in CERN unter mehreren Metern Strahlungsabschirmung aus Beton installiert. Entwurf, Herstellungsverfahren und Testergebnisse werden beschrieben. Über Erfahrungen mit dem automatischen Betrieb der Magnete und ihres Versorgungssystems wird berichtet. Bisher wurden fast 5000 Betriebsstunden ohne größere Störung erreicht.

<u>Inhalt</u>	Seite
1. Einleitung	1
2. Magnetische Entwurfsstudien	2
2.1 Zusätzliche Voraussetzungen	2
2.1.1 Luftspulen	3
2.1.2 Windungsblock	3
2.1.3 Mindestabstand	3
2.1.4 Eisenabschirmung	4
2.1.5 Symmetrie der Multipolkomponenten	4
2.2 Dimensionierung	6
2.2.1 Innenradius der Spulen	6
2.2.2 Azimutale Ausdehnung der Spulen	7
2.2.3 Außenradius der Spulen bzw. ihre Dicke	7
2.2.4 Position und Dicke des Eisenschildes	8
2.2.5 Länge	8
2.3 Fertigungstoleranzen und Feldgenauigkeit	10
2.3.1 Herstellungsgenauigkeit	10
2.3.2 Eisensättigung	12
3. Supraleiter	12
4. Fertigung der Einzelspulen und Quadrupole	15
5. Kryostate	23
6. Überwachungs- und Regelungssystem	29
6.1 LHe-Stand in den Kryostaten	29
6.2 LN ₂ -Stand in den Kryostaten	30
6.3 Standmessung und Druckregelung in LHe- und LN ₂ - Vorratsgefäßen	30

	Seite
6.4 Temperaturregelung der Stromzuführungen	31
6.5 Sicherung der Stromzuführungen	31
6.6 Sicherungen im Quenchfall	32
6.7 Überdrucksicherung der Kryostate	33
7. Tests der Magnete und Kryostate	33
7.1 Tests der Magnete	33
7.2 Tests der Kryostate	37
8. Magnetfeld-Messung	39
8.1 Meßprinzip	39
8.1.1 Meßsignalinterpretation	39
8.1.2 Sondensystem	40
8.1.2.1 Rechteckspulen	41
8.1.2.2 Spulenkörper	44
8.1.2.3 Zylinderspulen	44
8.2 Elektronik	44
8.2.1 AIDA	46
8.2.1.1 Hauptkanal-Integrationsmode	47
8.2.1.2 NebenkanaI-Integrationsmode	48
8.2.1.3 Automatische Spannungsverstärkung der momentanen Induktionsspannung	48
8.2.1.4 Zerlegung des Induktionsspannungs- integrals	48
8.2.2 Digital-Elektronik	50
8.3 Mechanik	50
8.4 Meßergebnisse	52
8.4.1 Symmetriefehler	53
8.4.2 Ikosapol	53
8.4.3 Stromabhängigkeit von Gradient und Fokussierstärke	54
9. Installation und Betriebserfahrungen	55

	Seite
10. Anerkennung	59
11. Literaturverzeichnis	60
Anhang A: Schrumpfvorgänge	62

1. Einleitung

Supraleitende Magnete werden in der Hochenergiephysik [1] vor allem aus Gründen der Energieeinsparung oder wegen ihrer Kompaktheit eingesetzt (z. B. Blaskammern, Projekt des Energy-Doubler am FNAL bei Chicago). Die sehr große erreichbare Stromdichte im Supraleiter gestattet es, in Experimenten an Speicherringen die um die Wechselwirkungszone geforderten Magnetfeldstärken mit Strömen in einer dünnen Materialschiicht zu erzeugen, die für die Sekundärteilchen ausreichend transparent ist und deren Nachweis und Identifikation auch außerhalb des Magneten gestattet [2,3]. Schließlich kann die Länge von Sekundärstrahlen aufgrund der höheren erreichbaren Feldstärken gegenüber der Auslegung mit normalleitenden Magneten verringert werden.

Die letztgenannte Anwendung erweist sich bei Experimenten mit Teilchen kurzer Lebensdauer als besonders vorteilhaft. Zu ihnen gehören Hyperonen, die im Schwerpunktsystem eine mittlere Lebensdauer τ von einigen 10^{-10} sec. haben; im Laborsystem vergrößert sich diese Zeit um den Faktor γ , das Verhältnis von Gesamt- zu Ruheenergie. Für Hyperonen mit einem γ von 50, d. h. an heutigen Großbeschleunigern typischen Werten, ergibt sich als Zerfallslänge

$$l = \gamma \cdot c \cdot \tau \approx 50 \cdot 3 \times 10^8 \text{ m/s} \cdot 10^{-10} \text{ s} = 1,5 \text{ m.} \quad (1.1)$$

Zwischen der Erzeugung der Hyperonen an einem Target und ihrem Nachweis müssen Magnete zur Führung, Fokussierung und Reinigung des Strahls von unerwünschten Teilchen stehen (z. B. von den Protonen des Primärstrahls). Die physische Länge dieser Magnete verringert die nachweisbare Teilchenrate, d. h. sie sind so kompakt wie möglich zu bauen. Da zur Abschirmung der sekundären Myonen magnetisiertes Eisen in vorgegebener Länge erforderlich ist, werden Dipole weiterhin normalleitend ausgelegt. Quadrupolmagnete, mit denen das Target im gewünschten Impulsbereich teilchenoptisch auf die Akzeptanz des Detektorsystems abgebildet wird, können dagegen supraleitend gebaut werden. Gute Erfahrungen mit supraleitenden Quadrupolen wurden seit 1971 in einem Hyperonenstrahl für das 25 GeV Protonensynchrotron in CERN gewonnen [4].

In der Auslegung eines entsprechenden Experiments für die 200 GeV Ausbaustufe des Super-Protonensynchrotrons von CERN wurden ebenfalls supraleitende Quadrupole vorgesehen. Abb. 1.1 zeigt ihre Po-

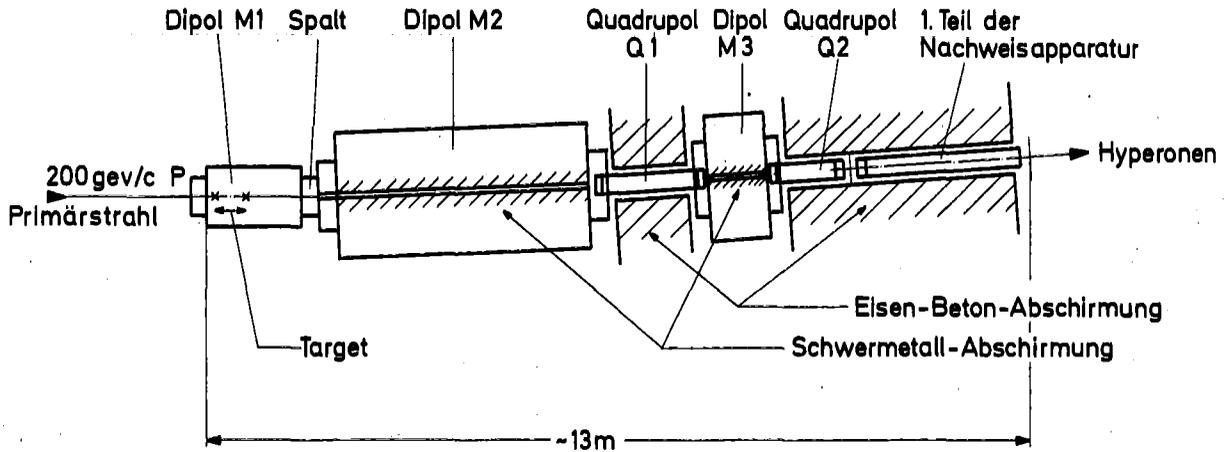


Abb. 1.1: Strahlführung der Hyperonen in CERN zwischen Erzeugung und Nachweis.

sition im Strahl dieses Experiments. Dabei sind 5 folgende Anforderungen zu erfüllen (g ist der Feldgradient):

Gesamtlänge	[m]	$\frac{Q_1}{\leq 1,7}$	$\frac{Q_2}{\leq 1,3}$
Fokussierstärke $\int_{-\infty}^{\infty} g dl$	[T/m·m]	180	130
Radius a der Apertur	[mm]	≥ 15	≥ 15
Feldfehler $(1 - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B(a)}{g \cdot a} dl)$	[%]	≤ 1	≤ 1
Gesamtdurchmesser in Enden	[mm]	≤ 240	≤ 240
Verbrauch an LHe	[l/h]	< 15	

Das Institut für Technische Physik des KfK wurde in Absprache mit dem CEN Saclay und dem Rutherford Laboratory, Chilton (England), als den Partnern in der GESSS-Kollaboration, im Herbst 1974 von CERN beauftragt, die beiden Magnete mit diesen Spezifikationen zu entwerfen, zu bauen, zu testen und in CERN in Betrieb zu nehmen.

2. Magnetische Entwurfsstudien

2.1 Zusätzliche Voraussetzungen

Für die Auslegung der Magnete wurden neben den von CERN gestellten Anforderungen die folgenden Voraussetzungen festgelegt.

2.1.1 Luftspulen

Jeder Quadrupol wird aus vier Luftspulen aufgebaut, die auf einem Trägerzylinder angeordnet sind. Eisenpole sollen im Gegensatz zur Technik in [4] nicht verwendet werden, sondern Eisen dient nur zur Abschirmung der Streufelder. Gründe für diese Entscheidung sind: die erforderliche hochgenaue Bearbeitung von Oberflächen der Eisenpole wird vermieden; wegen der Eisensättigung erreicht die Verwendung von Eisenpolen bei Präzisionsmagneten, deren Genauigkeit bei unterschiedlicher Erregung erhalten bleiben soll, eine Grenze und bietet kein weiteres Entwicklungspotential; bei Verwendung von Luftspulen liegt der erreichbare Gradient höher als bei Eisenpolen, so daß die geforderten Gesamtlängen unterschritten werden können; positive Erfahrungen mit Luftspulen im supraleitenden Dipol D2A existieren [6]. Zu den Nachteilen der Luftspulen gehört ein größerer Außendurchmesser und die Notwendigkeit, statt der Pole die Wicklungen hochpräzise herzustellen.

2.1.2 Windungsblock

Wegen der Kompaktheit des Magneten kann jeder Pol nur aus einem Wicklungsblock aufgebaut werden, im Gegensatz etwa zum Dipol D2A, der 15 Wicklungsblöcke je Pol enthält. Die Möglichkeiten zur Erhöhung der Feldgüte sind geringer als bei mehreren Wicklungsblöcken. Der Querschnitt des Wicklungsblockes soll aus Gründen der einfachen und präzisen Fertigung rechteckig sein. Das Ende wird als "equal-perimeter-end" ausgeführt, bei dem alle Windungen in einer Lage des Wicklungsblockes die gleiche Länge haben: die Windungslage wird gleichsam als breites Band um das Ende herumgeführt (Abb. 2.1). Dadurch werden mechanische Scherspannungen zwischen Windungen vermieden.

2.1.3 Mindestabstand

Aus Fertigungsgründen muß zwischen den Wicklungsblöcken zweier Pole ein Mindestabstand von 2 mm eingehalten werden.

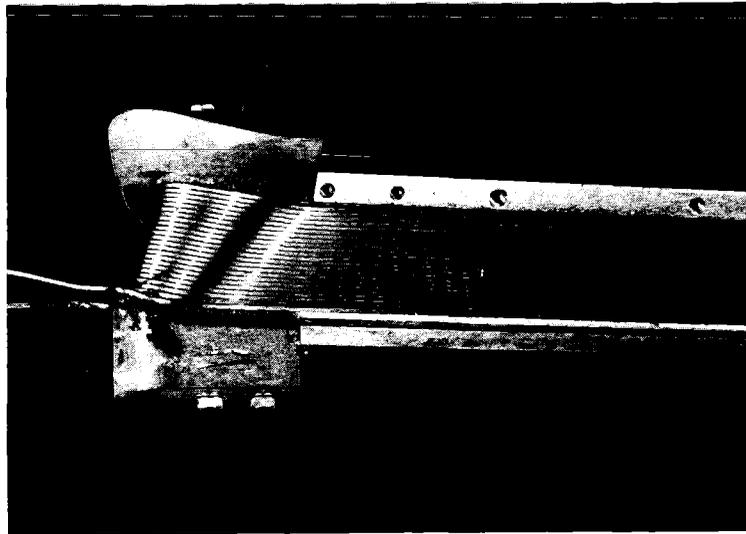


Abb. 2.1: Versuchswicklung eines "equal-perimeter"-Spulenendes.

2.1.4 Eisenabschirmung

Die Weicheisenabschirmung gegen Streufelder wird als Hohlzylinder um die Spulen angeordnet. Sie wird zusammen mit den Spulen auf 4,2 K abgekühlt, so daß komplizierte und verlustbehaftete Kraftabstützungen zwischen einer kalten Spule und einem warmen Eisenmantel vermieden werden. Der Durchmesser des Kryostaten wird dadurch vergrößert, seine Fertigbarkeit aber verbessert.

2.1.5 Symmetrie der Multipolkomponenten

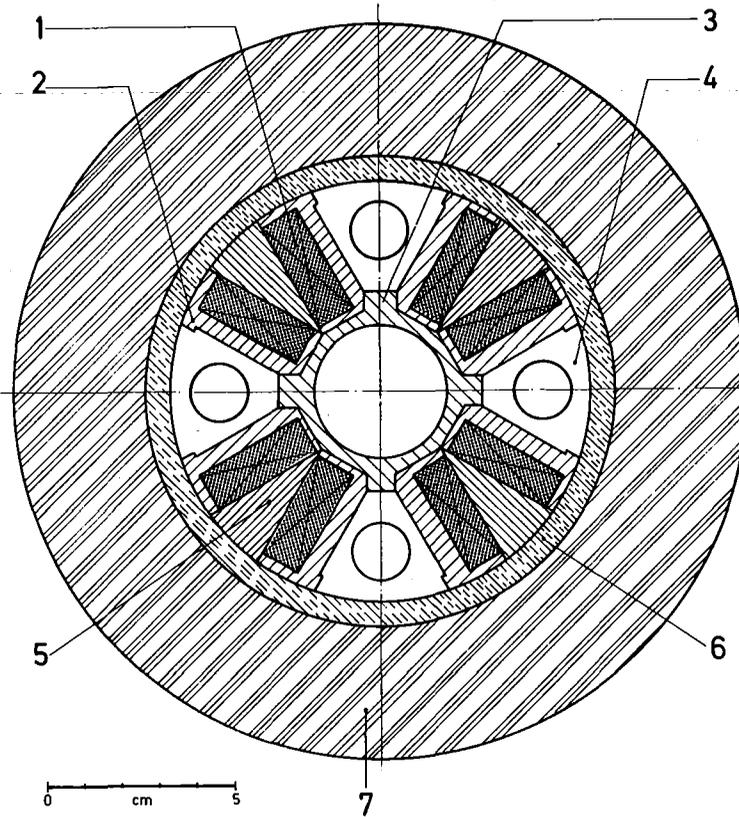
Der Querschnitt beider Quadrupole soll gleich sein, um Konstruktions- und Fertigungsschritte zu vereinheitlichen. Beide Magnete unterscheiden sich dann nur noch durch ihre Länge. Im Querschnittsbild sind die vier Pole mit entsprechender Symmetrie angeordnet. Das bedeutet, daß neben dem Quadrupolterm ($g \cdot r = C_2 \cdot r$) in einer Entwicklung des Feldes nach Multipolkomponenten [6, Abs. III.2] nur noch die Terme $C_6 \cdot r^5$, $C_{10} \cdot r^9$, (12pol, 20pol, usw.) auftreten können. Da bis auf den zugelassenen Feldfehler ein reines Quadrupolfeld verlangt ist, müssen diese Komponenten minimiert werden. Dazu steht nach der Entscheidung für nur einen rechtecki-

gen Wicklungsblock je Pol nur noch ein empfindlicher Parameter zur Verfügung, die azimuthale Lage α der Mittelebene des Wicklungsblockes relativ zur Mittelebene des Magneten (s. auch Abb. 4.1). Wählt man $\alpha = 15^\circ$, so verschwindet in einem unendlich langen Magneten mit diesem Querschnitt die 12-Pol-Komponente: $C_6 = 0$. Berücksichtigt man den Einfluß der Spulenenden auf die Multipolkomponenten des axial integrierten Feldes, so wird $C_6 = 0$ im Mittel der beiden verschieden langen Magnete für $\alpha = 14,85^\circ$ erfüllt. Während damit die störendste unerwünschte Feldkomponente ausgeschaltet ist, werden die Beiträge der Komponenten C_{10}, C_{14}, \dots durch Ausnutzung ihrer starken radialen Abhängigkeit innerhalb der Apertur unter den zulässigen Fehler reduziert. Tabelle 2.1 zeigt die Verteilung der Multipolkomponenten für das 2-dimensio-

Tabelle 2.1: Relative Stärke der bei symmetrischem Aufbau auftretenden Multipolkomponenten; langer Quadrupol.

Komponente N	Beitrag im 2-dim. Feld am Spulenrand		Beitrag im axialen Feld- integral am Spulenrand	
	bei a=15 mm		bei a=15 mm	
2	1,000	1,000	1,000	1,000
6	$4,6 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-4}$
10	$8,4 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$8,4 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-3}$
14	$1,8 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-4}$
18	$5,5 \times 10^{-4}$	$< 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-4}$	$< 10^{-6}$

nale Feld und das Feldintegral entlang der Achse, wie sie sich aus Berechnungen mit dem Computerprogramm MG 05 ergeben [6, Abs. III-1]. Unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Voraussetzungen ergibt sich im Prinzip ein Magnetquerschnitt, wie er in Abb. 2.2 dargestellt ist.



- 1 Wicklung
- 2 Wicklungsträger
- 3 Tragrohr
- 4 Stützkeil
- 5 Füllkeil
- 6 Al-Schrumpfring
- 7 Weicheisenabschirmung

Abb. 2.2: Querschnitt eines Quadrupolmagneten.

2.2 Dimensionierung

Die konstruktiven Abmessungen von Spule und Eisen werden mit den folgenden Argumenten bestimmt.

2.2.1 Innenradius der Spulen r_{ic}

Überschlagsrechnungen zeigen, daß der durch den 20-Pol erzeugte

Feldanteil am Innenrand der Spule etwa 10 % des Quadrupolanteils beträgt:

$$C_{10} \cdot r_{ic}^9 = 0,1 \cdot C_2 r_{ic} \quad (2.1)$$

Für den Radius $a = 15$ mm der Apertur muß der Gesamtfehler kleiner als 1 % sein. Vergibt man höchstens $1/3$ dieser Obergrenze für den prinzipiell unvermeidbaren 20-Pol-Anteil, so gilt

$$C_{10} \cdot a^9 < \frac{1}{300} \cdot C_2 a \quad (2.2)$$

Beide Gleichungen kombiniert: $r_{ic} \geq a \cdot (30)^{1/8} \approx 23$ mm.

2.2.2 Azimutale Ausdehnung b der Spulen

Berücksichtigt werden müssen der Innenradius r_{ic} , der Winkel α der Mittelebene, der Mindestabstand von 2 mm zwischen zwei Wicklungsblöcken:

$$b = r_{ic} \cdot \operatorname{tg} \alpha - 1 \text{ mm} = 23 \cdot \operatorname{tg}(14,85^\circ) - 1 \approx 5,0 \text{ mm} \quad (2.3)$$

2.2.3 Außenradius der Spulen r_{oc} bzw. ihre Dicke

Die radiale Ausdehnung der Spulen wird begrenzt durch die Forderung, daß der gesamte Außendurchmesser des Kryostaten in den Enden höchstens 240 mm wird. Außerdem muß berücksichtigt werden, daß sich mit wachsender Dicke der Spulen die "Feldüberhöhung" in ihrem Innern vergrößert, d. h. das Verhältnis von maximal auftretendem Feld zum Quadrupolrandfeld $g \cdot r_{ic}$. Da das maximale Feld gemäß der kritischen Kurve $j_c(B)$ die Stromdichte in der Spule bestimmt, liefert eine Vergrößerung der Spulendicke nur minimal größere Gradienten. In einer Beispielrechnung für $r_{ic} = 20$ mm wurde festgestellt, daß die Fokussierstärke $\int g dl$ eines Quadrupols mit $r_{oc} = 60$ mm nur um 7 % über der eines Quadrupols mit $r_{oc} = 45$ mm liegt, wenn jeweils die kritische Stromdichte des Supraleiters ausgenutzt wird. In Fällen, in denen die Magnetlänge unwichtig ist, sollte die Spulendicke daher klein sein (Einsparung von Leitermaterial). Da für die Anwendung im Hyperonenstrahl

Länge ein entscheidendes Kriterium ist, wurde eine Dicke von etwa 30 mm festgelegt. Mit ihr läßt sich die Forderung nach einem Außendurchmesser von 240 mm leicht einhalten: $r_{oc} = 53$ mm.

2.2.4 Position und Dicke d des Eisenschildes

Sättigung des Eisens soll vermieden werden, damit die Feldgenauigkeit erregungsunabhängig bleibt. Dazu sind zwei kritische Stellen zu betrachten:

- a) Flußdichte auf der Eisenoberfläche im Bereich eines Poles. An dieser Stelle tritt der Magnetfluß in das Eisen ein. Die Flußdichte hängt vom Abstand zwischen Spulen- und Eisenoberfläche ab. Bei 10 mm Abstand unterschreitet sie 2 T. Damit ergibt sich als Innenradius des Eisenzylinders $r_{iFe} = 63$ mm.
- b) Flußdichte im Eisenzylinder zwischen den Polen. Mit dieser Betrachtung wird die Dicke d des Eisens festgelegt. Nimmt man an, daß der Quadrupolfeldfluß durch die Mittelebene bis zum inneren Spulenradius durch das Eisen zurücktransportiert wird und dabei im Mittel nicht mehr als 1,5 T Flußdichte zulässig sein soll, so gilt

$$1,5T \cdot l \cdot d = \Phi = l \cdot \int_0^{r_{ic}} B \cdot dr = l \cdot \int_0^{r_{ic}} g \cdot r dr = l \cdot g \cdot \frac{r_{ic}^2}{2} \quad (2.4)$$

Mit $g = 160$ T/m ergibt sich $d = 30$ mm.

2.2.5 Länge

Damit sind alle Parameter festgelegt, die für den Querschnitt des Magneten maßgebend sind. Die Längen ergeben sich aus den Forderungen nach Fokussierungsstärke F und aus der erreichbaren Stromdichte. Für die $j_c(B)$ -Kurve im Bereich von 4 bis 5 Tesla wird ein linearer Verlauf mit typischen Werten der Firma VAC, Hanau, angesetzt (Abb. 2.3):

$$j_c [\text{kA/cm}^2] = 14 \cdot (9 - B [\text{T}]) \quad (2.5)$$

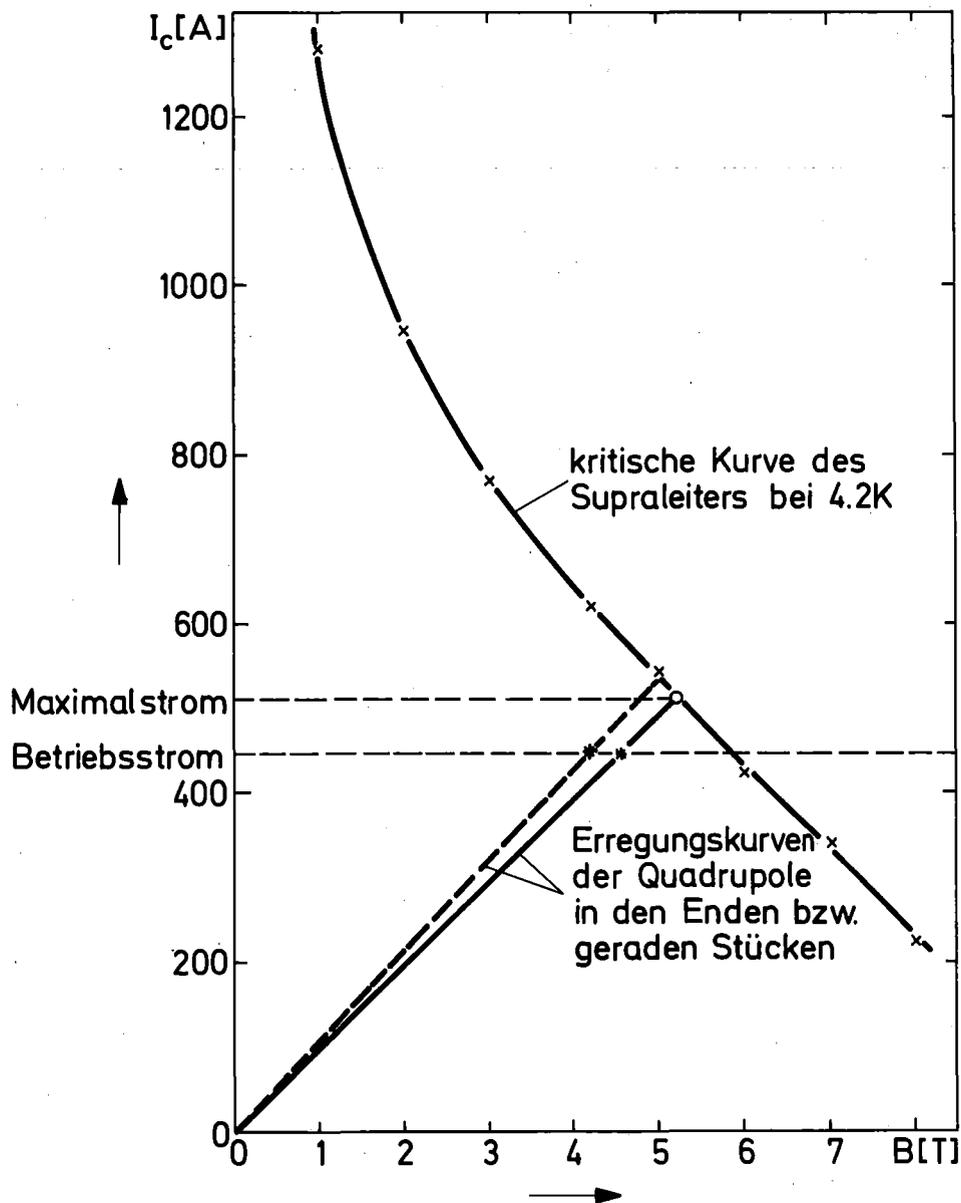


Abb. 2.3: Kritischer Strom des Supraleiters bei 4,2 K und Strom-Feld-Beziehung der Quadrupole.

Die "load-line" des Magneten, der Zusammenhang zwischen Stromdichte j und maximaler Magnetfeldstärke innerhalb der supraleitenden Wicklung, ergibt sich außerhalb der Spulenenden mit

$$B_{\max} [\text{T}] = 0,1 j [\text{kA/cm}^2] \quad (2.6)$$

Die maximal mögliche Stromdichte ergibt sich, wenn (2.6) in (2.5) eingesetzt wird, zu $j_c \approx 52 \text{ kA/cm}^2$. Für den Betrieb wird ein Sicherheitsfaktor von 20 % angesetzt, mit dem Feldüberhöhungen in den Spulenenenden gegenüber dem 2dimensionalen Bereich und Schwankungen der kritischen Stromdichte entlang der Länge des Supraleiters berücksichtigt werden. Für den Betrieb wird damit eine mittlere Stromdichte von $\langle j \rangle = 42 \text{ kA/cm}^2$ festgesetzt.

Jetzt lassen sich aus dem damit erreichbaren Gradienten von 156 T/m sowie dem Beitrag der Spulenenenden zur Fokussierstärke die Spulenlänge ermitteln:

$$l_1 = 1190 \text{ mm,}$$

$$l_2 = 875 \text{ mm.}$$

In Tabelle 2.2 sind die Daten der Magnete zusammengestellt, die sich aus vorstehenden Überlegungen ergeben.

2.3 Fertigungstoleranzen und Feldgenauigkeit

2.3.1 Herstellungstoleranzen

Der Einfluß der Fertigungstoleranzen auf die Feldgenauigkeit wurde mit dem Programm MG 13 [6, Abs. II-1] untersucht. Die veränderten Multipolkomponenten werden für Geometrien ermittelt, die aufgrund von Zufallszahlen innerhalb einer vorgebbaren Schwankungsbreite von der Sollgeometrie abweichen. Der Einfluß einzelner Fehler, etwa bei der Herstellung einer Spule, der Anordnung der Pole gegeneinander oder des gesamten Magneten gegenüber dem als ungesättigt angenommenen Eisenzyylinder, läßt sich ebenso berechnen wie der von Fehlerkombinationen. Die numerischen Rechnungen ergaben, daß als kritischster Fehler die Störung der Winkelsymmetrie in der gesamten Anordnung anzusehen ist. Diese Störung kann sowohl durch Abweichungen in der Herstellung der Einzelspulen als auch durch die Fertigung des zentralen Tragrohres hervorgerufen werden. Für diese Komponenten ist deshalb eine Herstellungsgenauigkeit von 0,1 mm zu fordern, um den Feldfehler in der gleichen Größenordnung zu halten wie

Tabelle 2.2: Übersicht über die Entwurfsdaten für beide Quadrupole

Durchmesser der kalten Bohrung	36 mm
Innendurchmesser der Spulen	46 mm
Außendurchmesser der Spulen	107,4 mm
Spulenhöhe	10 mm
Neigungswinkel der Wicklungen	14,85°
Wicklungsform	rechteckiger Block
Windungszahl je Block	288 = 12 x 24
Endform	Möbiuskonfiguration
Innendurchmesser des Eisens	126 mm
Außendurchmesser des Eisens	196 mm
Eisenform	Hohlzylinder
Spulenlängen	1190 bzw. 875 mm
Eisenlängen	1250 bzw. 935 mm
Kryostatlängen	1350 bzw. 1050 mm
Außendurchmesser im Mittelteil	350 mm
Außendurchmesser in Enden	240 mm
2-dimensionaler Gradient	156 T/m
Fokussierstärken	180 bzw. 130 T·m/m
$\Delta B/B$ bei 30 mm Apertur	$< 1 \times 10^{-2}$
Maximalfeld in der Spule - Mitte	4,2 T
Maximalfeld in der Spule - Enden	4,5 T
mittlere Stromdichte im Block	420 A/mm ²
gespeicherte Energie	40 bzw. 30 kJ
Supraleiterquerschnitt mit Isolation	1,28 x 0,83 mm ²
Betriebsstrom	445 A
Gesamtlänge des Leiters	4 800 m
Kühlmethode	Heliumbad mit N ₂ -Schild
Kühlverluste insgesamt	< 15 l LHe/h

den durch die 20-Pol-Komponente hervorgerufenen.

2.3.2 Eisensättigung

Eine weitere mögliche Quelle für Fehler in der Feldverteilung ist die mit großer Erregung beginnende Sättigung des Abschirmzylinders. Dazu wurden Rechnungen mit dem 2dimensionalen statischen Magnetfeldprogramm MAGNET durchgeführt, das bei CERN entwickelt wurde [7]. Die bei ungesättigtem Eisen und bei variabler Erregung gefundenen Feldverteilungen wurden miteinander verglichen. Sättigungsbedingte Fehler ergeben sich aus Unterschieden in den normierten Feldverteilungen. Es wurden Abweichungen von weniger als 10^{-3} gefunden; sie liegen in der gleichen Größenordnung wie die Rechengenauigkeit von Programmen wie MAGNET. Gravierende sättigungsbedingte Fehler waren nach dieser Untersuchung nicht zu erwarten.

3. Supraleiter

Nach Festlegung der Stromdichte auf 42 kA/cm^2 für den gesamten Wicklungsblock muß die Querschnittsfläche des Einzelleiters und damit der Betriebsstrom des Magnetes definiert werden. Um den Raum möglichst vollständig auszufüllen, der im Wicklungsblock zur Verfügung steht, wird ein Leiter mit rechteckigem Querschnitt gewählt. Für die Betriebsstromstärke ergibt sich eine obere Grenze durch die zusätzlichen Verluste an flüssigem Helium, die für die Kühlung der Stromzuführungen aufgebracht werden müssen. Diese wurden für 700-A-Stromzuführungen auf 1,2 W pro Kryostat abgeschätzt. Da außerdem der Platz für die Stromzuführungen im Versorgungsteil des Kryostaten beschränkt ist, wurde die Stromstärke auf maximal 500 A begrenzt. Für den Fall eines Quenches, d. h. eines ungewollten Normalleitendwerdens eines Magneten, sind die Spannungen von maximal etwa 100 V, die bei dieser Stromstärke innerhalb eines Quadrupols auftreten können, mit konventioneller Isoliertechnik beherrschbar. Die Quenchspannung steigt mit abnehmender Stromstärke.

Als geeigneter Supraleiterdraht für diesen Betriebsstrom wurde das Material VACRYFLUX 5001, Typ F 1900 der Firma VAC, Hanau, ausgewählt. Seine Daten sind in Tab. 3.1 zusammengestellt. Abb. 3.1 zeigt ein Querschnittsbild.

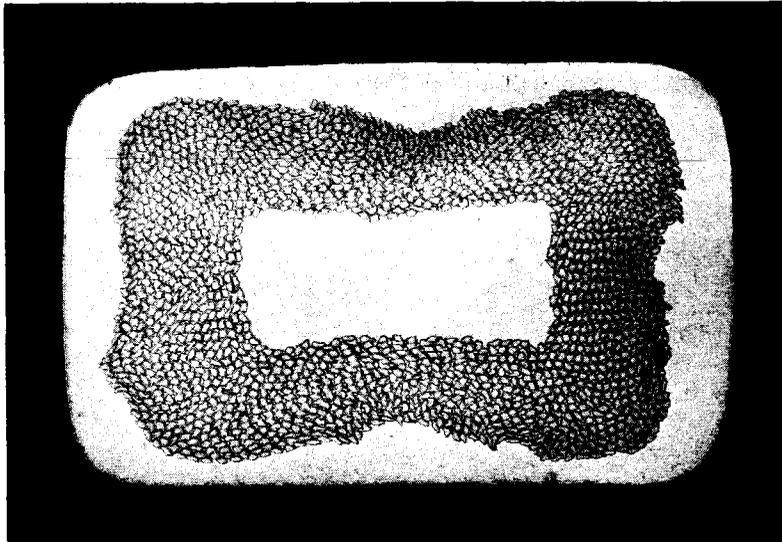


Abb. 3.1: Querschnittsbild des Supraleiterdrahtes (Foto: VAC)

Tabelle 3.1: Daten des Supraleiterdrahtes

Bezeichnung	VACRYFLUX 5001 Typ 1900
Abmessungen unlackiert	$(1,20 \pm 0,03) \times (0,75 \pm 0,03) \text{ mm}^2$
lackiert	$(1,28 \pm 0,03) \times (0,83 \pm 0,03) \text{ mm}^2$
Zahl der Filamente	1920
Durchmesser der Filamente	ca. 15 μm
Twiststeighöhe	20 mm
Kupfer: NbTi-Anteil	$\geq 1,95:1$
Restwiderstandsverhältnis des Kupfers	ca. 150

Zur Herstellung der 8 Einzelpulen, von denen jede 288 Windungen (12 Lagen à 24 Windungen) besitzt, wurden 4800 m dieses Leiters benötigt. Diese Menge wurde in 4 Unterlängen geliefert. Der kritische Strom wurde an Proben vom Anfang und

Ende jeder dieser Längen bestimmt. Er zeigt eine Schwankungsbreite von ca. 5 %: bei 4,2 T und 4,2 K wurden kritische Ströme zwischen 618 A und 672 A ermittelt. Die in Abb. 2.3 dargestellte Kurve j_c (B) bezieht sich auf die schlechteste Probe.

Die Abmessungen des Leiters wurden mit einer Meßapparatur überprüft (Abb. 3.2), die in zwei Ebenen messen kann. Zwei induktive Meßwertgeber erlauben die kontinuierliche Bestimmung einer Höhen- und Breitendifferenz, die auf einem Schreiber dokumentiert wird. Die Meßgenauigkeit beträgt 1 μm . Es stellte sich

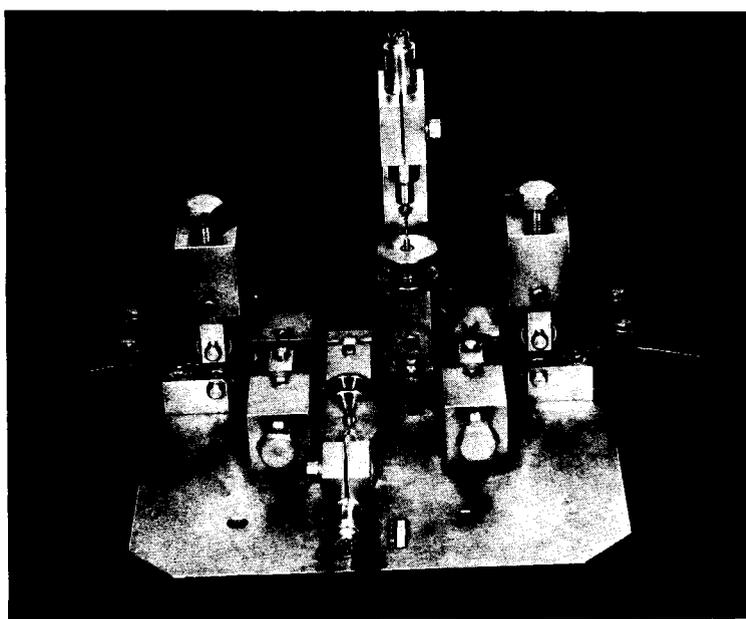


Abb. 3.2: Vorrichtung zur Bestimmung der Leiterabmessungen.

heraus, daß die Leiterabmessungen innerhalb der erlaubten Toleranzen schwanken: das größte Istmaß einschließlich Lackisolation beträgt $1,310 \times 0,855 \text{ mm}^2$, das kleinste $1,260 \times 0,810 \text{ mm}^2$. Da die Abmessungen sich langsam entlang der Leiterlänge ändern, waren systematische Abweichungen in den Dimensionen der 8 Einzelpulen zu erwarten. Um die Quadrupolsymmetrie zu gewährleisten und die Maße des Wicklungsträgers eindeutig festlegen zu können, wurde der gesamte Leiter durch einen Türkenkopf gezogen und auf einen Querschnitt von $1,26 \times 0,81 \text{ mm}^2$ kalibriert. Die Maßhaltigkeit nach dem Kalibrieren ist besser als 10 μm .

In Untersuchungen an einem Probestück von 60 m wurde vor dem Kalibrieren sichergestellt, daß die zusätzliche Kaltverformung des Leiters die kritischen Stromwerte nicht verschlechtert, die Lackisolation weder bei Raum- noch bei LN_2 -Temperatur beschädigt und die unvermeidliche Verringerung des Restwiderstandsverhältnisses im Kupfer tolerierbar bleibt (von 180 auf 140). Zur Isolationsprüfung wurde der gesamte Leiter durch ein Solebad gezogen, wobei eine Spannung zwischen dem Leiterende und dem Badbehälter anlag. Jeder Isolationsfehler läßt sich so optisch oder akustisch anzeigen und auf einem Schreiber dokumentieren. Eine Fehlerrate von 1/Meter Leiterlänge wurde nicht überschritten.

Als weitere Maßnahme der Leiterprüfung wurde die Kupfermatrix über einige Zentimeter abgeätzt, so daß nur die reinen NbTi-Filamente erhalten blieben. Etwa 20 Filamente waren nach dem Ätzen gebrochen; ihre Zahl erhöhte sich beim kalibrierten Leiter auf etwa 25 bis 30. Weitere Brüche konnten durch geringe manuelle Knickbelastung des Filamentbüschels herbeigeführt werden.

4. Fertigung der Einzelspulen und Quadrupole

Abb. 4.1 zeigt eine Einzelspule mit Wicklungsträger und Abstandskeilen sowie deren Befestigung auf dem zentralen Tragrohr aus V2A-Stahl, das einen inneren Durchmesser von 36 mm besitzt. Die Wicklungsträger (Werkstoff 4571) bestehen aus zwei U-Schienen, die mit Abstandskeilen verschraubt und verstiftet sind. Sie mußten ebenso wie die tragende Flächen des zentralen Rohres mit hoher Maßgenauigkeit angefertigt werden, um die geforderte Feldgenauigkeit zu garantieren.

Alle lösbaren Verbindungen, Schrauben und Stifte, wurden mit Loctite eingeklebt. Die Wicklungsträger wurden auf einer numerisch gesteuerten Fräsmaschine fertiggestellt. Bedingt durch die Tatsache, daß an der Fräsmaschine nicht der Fräskopf, sondern nur der Tisch schwenkbar ist, mußten die Grundflächen des Wicklungsträgers nicht, wie es vorteilhafter gewesen wäre, mit einem Stirnfräser, sondern mit einem Walzenfräser bearbeitet

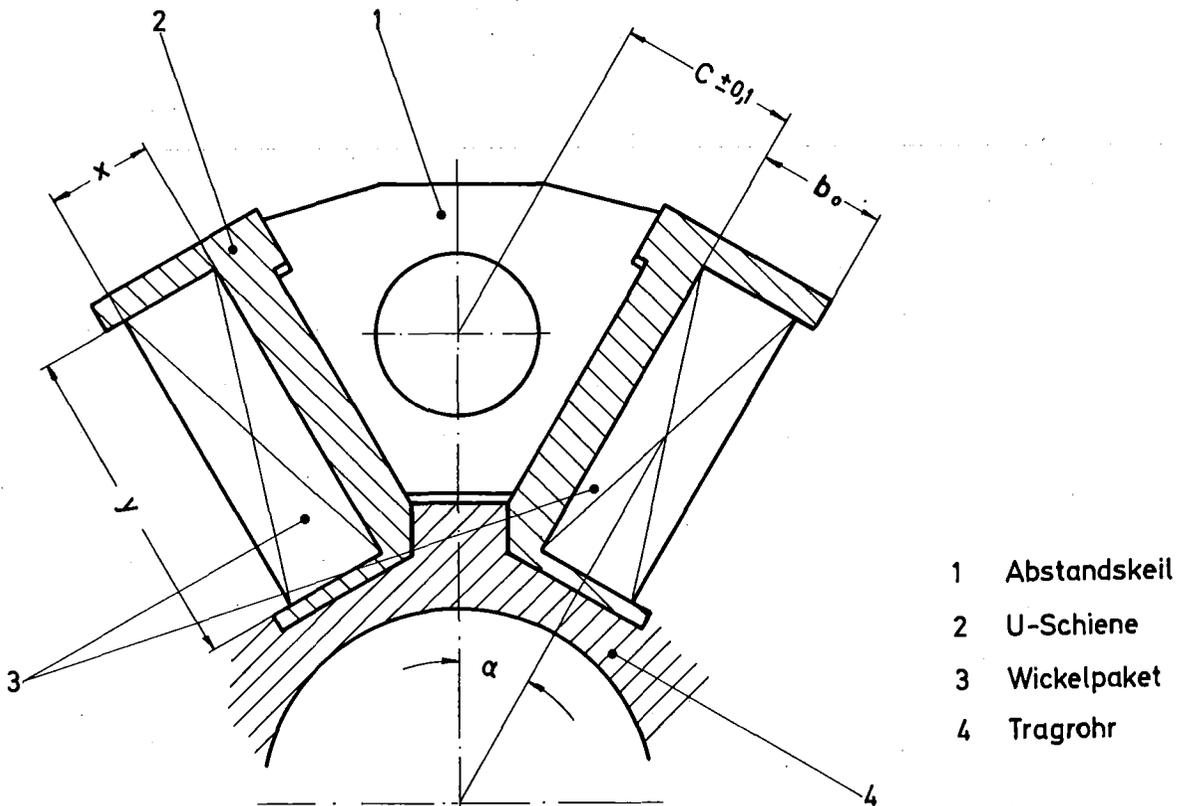


Abb. 4.1: Wicklungsträger und Abstandskiel zur Fertigung einer Einzelspule

werden. Die dadurch entstandene schlechte Oberfläche (eingedrückte Späne) mußte von Hand nachbearbeitet werden, nachdem es in einer Einzelspule zu einem Massenschluß gekommen war. Ein Vlies (VILEDON, 0,1 mm dick), das zur Isolation dient, wurde eingelegt und mit Epoxydharz (CY 221, Härter HY 979; Mischungsverhältnis 100/30) aufgeklebt. Eine Durchschlagsprüfung nach dem Aushärten mit 1000 V ergab keine Durchschläge.

Die Endstücke (Möbiuskonfiguration) wurden an den U-Schienen und Abstandskielen angeklebt und zusätzlich verschraubt. An den Enden treten aufgrund des Wickelzuges hohe Normalkräfte auf. Dadurch ist die Gefahr eines Massenschlusses gegeben. Um dies zu verhindern, wurden die Endstücke aus GFK-Material angefertigt.

Das Sollmaß des Wicklungsträgers, in den das Wickelpaket eingelegt wird, wurde in folgender Weise festgelegt. Ein Stapelwerkzeug wurde angefertigt, in dem aus dem kalibrierten Supraleiter 24 Windungen nebeneinander sowie 12 Lagen aufeinander gewickelt wurden. Jede Lage wurde mit Epoxydharz eingestrichen und anschließend angepreßt. Mit dieser Methode konnte das Istmaß gemessen und das Sollmaß der Wicklungsträger x und y nach Abb. 4.1 bestimmt werden. Es ergab sich, daß die Epoxydharzschicht pro Lage $7/1000$ mm aufgetragen hatte.

In die so dimensionierten Wicklungsträger wurden nach Einstellen des Wicklungszuges von 45 N und Feststellung des Nullmaßes a_0 die einzelnen Lagen in folgenden Schritten eingebracht (Abb. 4.2):

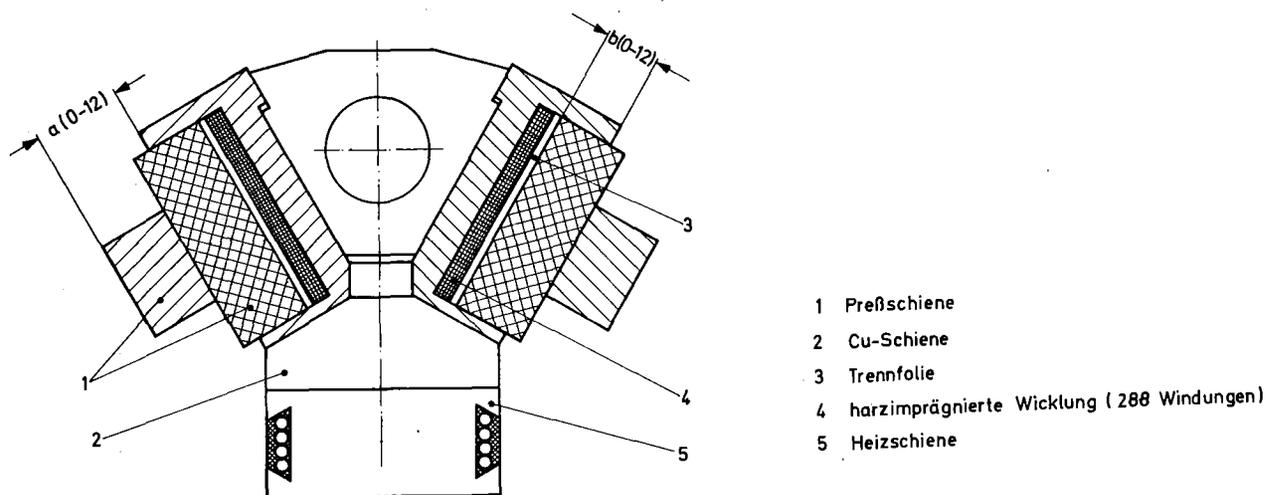


Abb. 4.2: Querschnitt eines Wicklungsträgers mit Heizschiene

1. Einstreichen der vorgegebenen Fläche mit Epoxydharz;
2. Einlegen der 24 Windungen;
3. Vorpressen der Windungen;
4. Ausrichten des Leiters an den Enden (ggfs. andrücken);
5. Einlegen der Trennfolie aus Teflon;
6. Im Maß a geschliffene GFK-Preßschiene auf die Trennfolie legen;
7. Zur Versteifung sowie als Referenzfläche eine geschliffene Metall-Preßschiene auflegen;

8. Pressen der gewickelten Lage auf Sollmaß a (Abb. 4.3);



Abb. 4.3: Pressen einer gewickelten Lage auf Sollmaß nach Anbringen der Heizschiene

9. Aushärten mittels Heizschiene (um gleichmäßig und schnell die Wärmeenergie zum harzimprägnierten Leiter zu transferieren, wurde eine Cu-Schiene zwischen Wicklungsträger und Heizschiene eingelegt);
10. Demontage der Heiz- und Preßschiene sowie der Trennfolie;
11. Messen des Istmaßes b;
12. Prüfung auf Durchgang und Durchschlag (100 V).

Diese Arbeitsgänge wiederholen sich nach jeder Lage.

Bei dieser Wickelmethode liegt der Drahtlagenübergang außerhalb der geraden Strecke an den Enden. Um die definierte Windungszahl zu erreichen, wurde das Ende des Spulenkörpers, an dem der Lagenübergang stattfindet, so ausgebildet, daß die Blockbreite y nach innen und außen in radialer Richtung um je eine Drahtbreite vergrößert wurde (Abb. 4.1 und 4.4).

Nach Fertigstellung der vier Einzelspulen eines Magneten wurden diese auf die entsprechenden Paßkeile, die auf dem Trag-

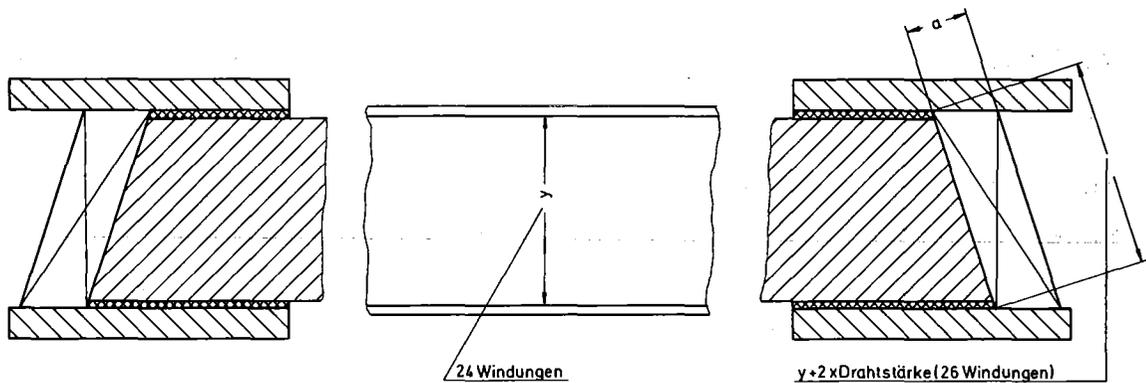


Abb. 4.4: Zunahme der Wicklungsbreite
am Lagenübergang

rohr in longitudinaler Richtung verlaufen, aufgesetzt und verschraubt (Anzugsmoment 9 Nm). Dadurch wurde eine genaue Positionierung ermöglicht. Die Verschraubung der Einzelpole erfolgte so, daß die Schrauben an zwei um 180° am Tragrohr versetzten Stellen gleichzeitig angezogen wurden. Während des Verschraubungsvorgangs wurde die Konzentrität mit zwei gegenüberliegenden Meßuhren überwacht.

Um die magnetischen Kräfte aufzufangen, wurden die Wicklungen gegeneinander mit Füllkeilen aus V2A abgestützt. Vor dem Einsetzen der Füllkeile wurden Teflonstreifen auf die Wicklungen aufgeklebt, um diese vor Beschädigungen zu schützen (Abb. 4.5).

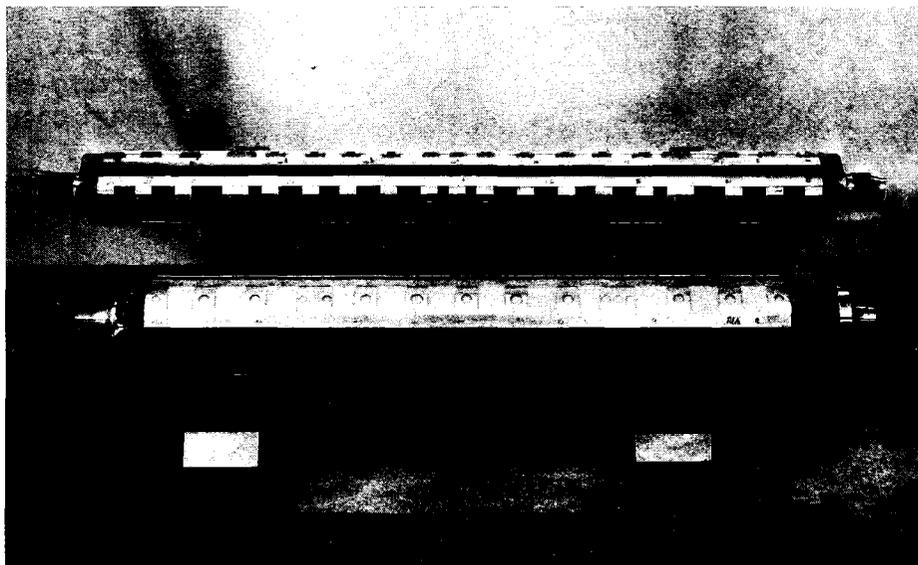


Abb. 4.5: Montierte Einzelpulen mit Teflonschutz-
Streifen vor Einsetzen von Füllkeilen

Verbleibende Hohlräume zwischen Wicklung und Füllkeil wurden mit Silikonkautschuk ausgefüllt.

Auf die bisher nur auf dem Tragrohr fixierten sowie gegeneinander abgestützten Einzelspulen wirken beim Betrieb unter anderem radial nach außen weisende magneto-mechanische Kräfte. Es ist daher erforderlich, die Spulen zusätzlich abzustützen. Dazu wurde keine durchgehende Bandagierung der Quadrupoleinheit vorgesehen, sondern ihre Verstärkung durch einzelne Ringe aus einer hochfesten Al-Legierung, die an den Stellen aufgebracht werden, an denen sich die Abstandskeile der Einzelspulen befinden. Dadurch kann LHe in unmittelbare Nähe des Supraleiters gelangen. Um zu gewährleisten, daß die Ringe auch bei kryogener Temperatur kraftschlüssig auf dem Quadrupol anliegen, werden sie aufgeschrumpft. Zu diesem Zweck wurde jede Quadrupoleinheit am Außendurchmesser auf Paßmaß gedreht. Um die Schnittkräfte während des Abdrehens zu kompensieren, wurden die Füllkeile einerseits mit Epoxydharz an die Wicklungsträger geklebt und andererseits durch spezielle Halteringe zusätzlich gesichert (Abb. 4.6). Zum Schrumpfen wurden die Al-Ringe auf ca. 150° C er-

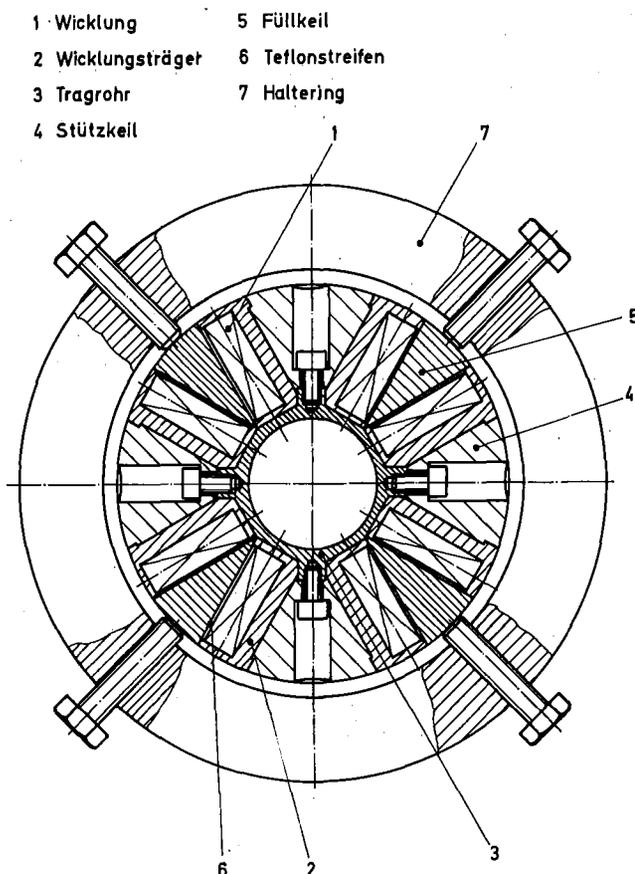


Abb. 4.6:

Fixierung der Einzelspulen beim Abdrehen

wärmt. Um eine zu schnelle Abkühlung zu vermeiden, wurden sie vor dem Aufheizen mit Asbestband umwickelt, das entfernt wurde, sobald die endgültige Position erreicht war.

Der mit den Al-Ringen armierte Quadrupol stellt jetzt einen kräftemäßig selbsttragenden Magneten dar, der allerdings zur Feldverstärkung und zur Abschirmung des Außenraumes gegen Streufelder noch in einen Weicheisenzylinder eingebracht werden soll (Abb. 4.7). Auch hierzu wird die Schrumpftechnik angewendet, weil

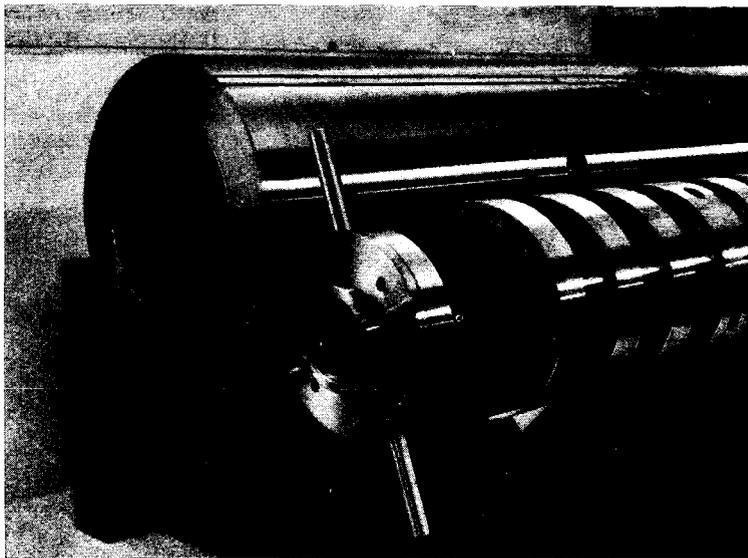


Abb. 4.7: Quadrupol mit Aluminium-Ringen und elektrischer Verbindung der Einzelspulen vor dem Einschrumpfen in Weicheisenabschirmung

sie einen konzentrischen und bei allen Temperaturen festen Sitz des Magnetkörpers gewährleistet. Da das Eisen für die weitere Fertigung als mechanische Referenz für die Magnetposition verwendet wird, ist auch die longitudinale und azimutale Lage im Eisen zu fixieren. Das geschieht durch Schrauben, die das zentrale Tragrohr über die (Abb. 4.7) erkennbaren Öffnungen direkt mit dem Eisenzylinder verbinden. Für den Einschrumpfvorgang wurde eine Vorrichtung entwickelt, deren Funktion in Abb. 4.8 dargestellt ist. Für das während des Schrumpfens notwendige Spiel zwischen Magnetaußendurchmesser und Innendurchmesser des Eisens

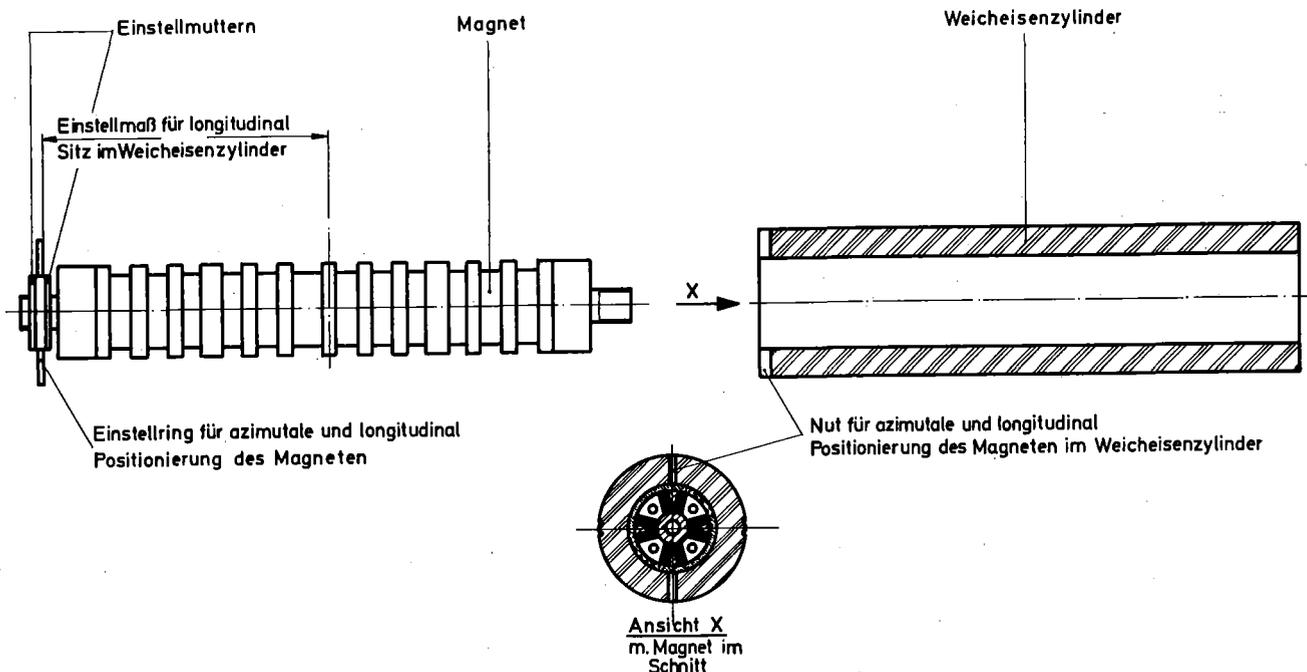


Abb. 4.8: Prinzip des Schrumpfvorganges
in den Eisenzylinder

wurde der Magnet auf 77 K unterkühlt, während das Eisen auf Raumtemperatur blieb. Die longitudinale Kontraktion des Magneten wurde zur korrekten Positionierung mit dem Einstellring ausgeglichen.

Um die Gefahr zu verringern, daß der Magnet während des Einschrumpfens im Eisen steckenbleibt, wurde ein Paßsitz zwischen Eisen und Al-Ringen nur in der Mitte und an jedem Ende des Magneten vorgesehen. Der Innendurchmesser des Eisens vergrößert sich in zwei Stufen um jeweils 0,1 mm zu dem Ende hin, in das der Magnet beim Schrumpfen eingeführt wird. Während die drei Al-Ringe, an denen der Paßsitz vorgesehen ist, auf die durch Rechnungen und Experimente festgelegten Sollmaße bearbeitet wurden, wurden die anderen Ringe auf Untermaß abgedreht, so daß sie mit dem Eisen nicht in Berührung kommen. Eine detaillierte Darstellung der Schrumpfvorgänge bei der Fertigung der Quadrupole sowie der resultierenden mechanischen Spannungen, die bis an die Fließgrenze der Materialien heranreichen, ist im Anhang A gegeben.

Abschließender Fertigungsschritt war die elektrische Verbindung der vier Spulen untereinander. Die Kontakte der Einzelspulen sind auf einem stirnseitig am Magneten befestigten GFK-Flansch aufgebracht (Abb. 4.9). Jeder Leiterkontakt besteht aus zwei Kup-

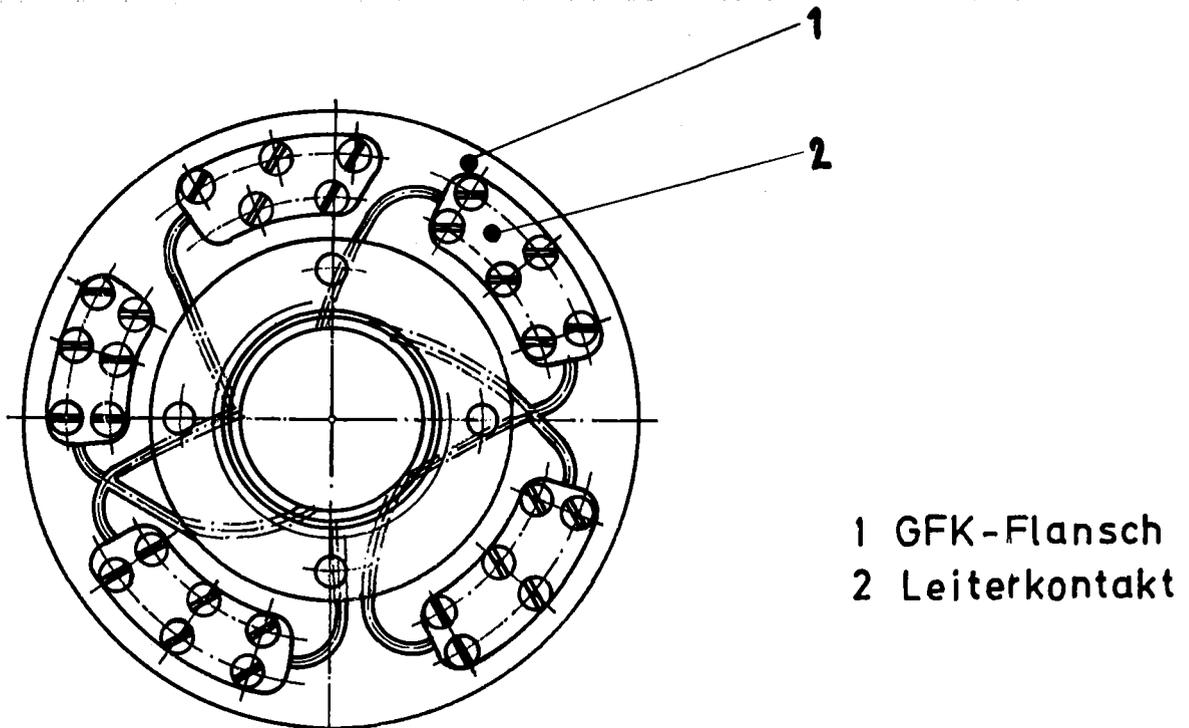


Abb. 4.9: Flansch zur Verbindung der Einzelspulen untereinander und mit der Stromzuführung

ferplatten (Grund- und Druckplatte). Nach dem Einlöten des Leiters in die Nut der Grundplatte mit Indiumlot wurde durch Verschraubung der Druckplatte eine zusätzliche Pressung auf den Leiter in der Nut erzeugt, um guten Übergangswiderstand zu erreichen. Die Stromzuführung zur Grundplatte geschieht durch vollstabilisierte Supraleiter, die in Nuten auf dem Außenmantel des Eisenzylinders geführt werden (s. Abb. 4.7).

5. Kryostate

Die Kryostate sind ebenso wie die anderen Bestandteile der beiden Magnete bis auf ihre Längen identisch. Ihr prinzipieller Aufbau ist in Abb. 5.1 am Beispiel der kürzeren Ausführung dargestellt. Ein horizontaler Teil mit dem Magneten und ein vertikaler Teil mit den Versorgungseinrichtungen können unterschieden werden. Beide bestehen aus drei konzentrischen Hohlzylindern aus V2A, die den LHe-, LN₂- und Vakuum-Tank darstellen (Abb. 5.2).

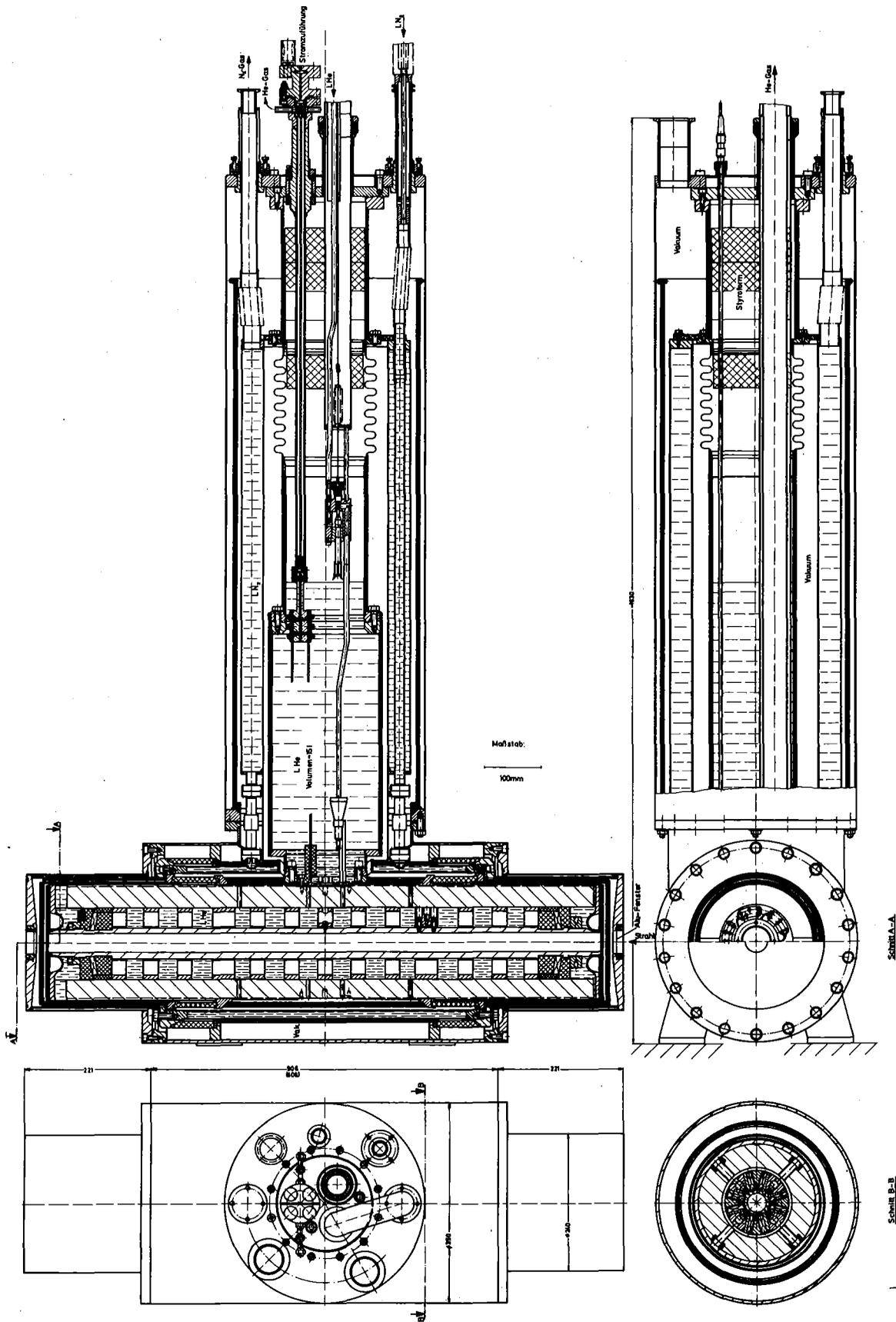


Abb. 5.1: Übersicht über Magnet und Kryostat (kurzer Quadrupol)

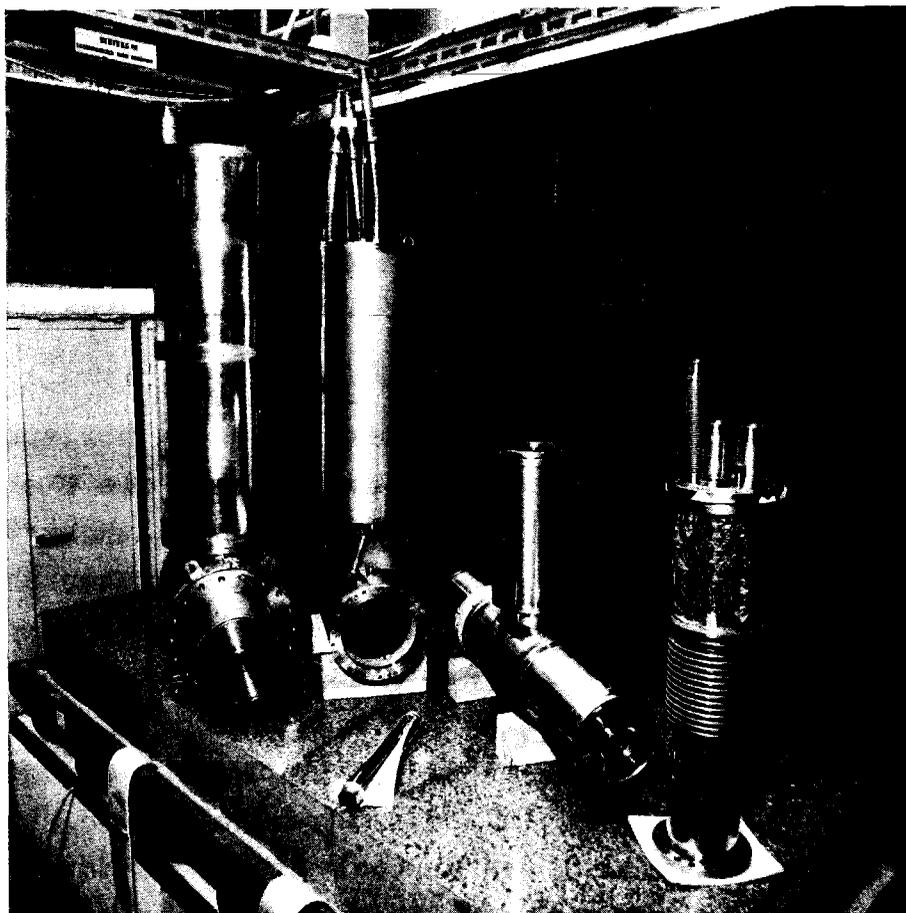


Abb. 5.2: Bauteile eines Kryostaten mit Magnet im Heliumtank

Horizontale und vertikale Tanks sind in der Mitte des Magneten zusammengeflanscht. Zwischen den Tanks befindet sich Superisolation als Strahlungsschild.

Die horizontalen Zylinder stützen sich über GFK-Ringe an jedem Ende des Kryostaten gegeneinander ab. Die Ringe sind die einzigen thermischen Brücken zwischen den Tanks. Sie wurden daher geschlitzt, um den Weg für den Wärmefluß zu verlängern. Die tragenden Flächen der Ringe sind konisch bearbeitet und auf entsprechende Flächen auf den Tankoberflächen angepaßt. Der Kegelminkel ergibt sich aus dem Verhältnis von radialer und longitudinaler Kontraktion beim Abkühlen von Raum- auf LHe-Temperatur.

Dadurch werden in den Ringen thermische Verspannungen vermieden. In einer ersten Version waren die Ringe auch auf ihrem Umfang geschlitzt, um einen besseren Sitz der tragenden Flächen gegeneinander zu erreichen. Nach dem Einbau stellte sich aber heraus, daß sie damit so flexibel geworden waren, daß sich der Heliumtank beim Abkühlen um mehrere Millimeter gegenüber dem Vakuumtank verschob. Die Flexibilität wurde bei neu gefertigten Ringen mit durchgehend bearbeiteten tragenden Flächen reduziert, so daß sich auch der etwa 300 kg wiegende lange Quadrupol beim Abkühlen nur um einige 1/10 mm gegen den Vakuumtank verschob. Eine solche Versetzung ist tolerierbar.

Die Magnete befinden sich im LHe-Bad des innersten horizontalen Tanks. Wegen des Gleichstrombetriebes enthält die Wicklung keine Kühlkanäle, doch benetzt das Helium die Wicklungsträger und Spulenkanten auf etwa der halben Länge des Magneten an den Stellen, an denen sich keine Abstandskeile und Schrumpfringe befinden. Die Flüssigkeit kann sich durch Bohrungen in den Abstandskeilen in axialer Richtung ausbreiten. Im Normalbetrieb wird LHe aus einem Reservoir im vertikalen Versorgungsteil nachgeliefert, dessen Füllstand nachgeregelt wird. Zum Abkühlen wird dort ein Ventil von außen bedient, so daß das Helium durch Verteilerröhren in den Bereich unterhalb des Magneten geleitet wird und damit ein effektives Kühlen gewährleistet.

Die Enden des horizontalen LHe-Tanks sind durch Kappen verschlossen, die an das Tragrohr des Magneten und an den LHe-Tank geschweißt sind. Die Kappen sind als Federn ausgebildet, die Belastungen in axialer Richtung aufnehmen können. Grund dafür ist die Überlegung, daß die Temperatur der Tankhülle beim Abkühlen schneller abnimmt als die des Magneten selbst mit seiner großen Masse. Dadurch kontrahiert die Hülle eher als der Magnet; die entsprechende mechanische Belastung muß in den Endkappen aufgefangen werden, ohne die Schweißnähte zu gefährden.

Die horizontalen Tanks für LN_2 und Vakuum verjüngen sich an beiden Enden der Magnete von 350 mm Durchmesser auf 240 mm. Dadurch können die Quadrupole zwischen die Erregerspulenköpfe der benachbarten normalleitenden Dipolmagnete geschoben werden, so daß sich die Länge der gesamten Strahlführung für die Hyperonen weiter reduziert. Das Magnetfeld der Dipole wird so abgeschirmt, daß keine Kraftwirkung auf den Weicheisenzylinder der Quadrupole oder auf die Quadrupolspulen selbst auftritt. Um die Verjüngung in den Enden zu erreichen, werden an den LN_2 -Tank Kappen aus Kupferblech, an den Vakuumtank Kappen aus V2A-Blech angeschraubt. In den Kappen des Vakuumteils befinden sich Öffnungen von 36 mm Durchmesser zum Strahlein- und -austritt. Sie werden mit einem Al-Blech von 0,7 mm Dicke verschlossen. Diese Materialbelegung ist für Hyperonen der vorgesehenen Energie nahezu unbedeutend.

In Abb. 5.3 sind die gasgekühlten Stromzuführungen dargestellt, die im vertikalen Versorgungsteil der Kryostaten angebracht sind. Sie bestehen aus zwei Leitern aus Kupfergeflecht, die durch eine GFK-Platte voneinander isoliert und in einem Rohr angebracht sind. Das kalte Heliumgas tritt oberhalb des Heliumreservoirs ein, das warme Gas unterhalb der Steckverbindungen für die Netzkabel aus. Am kalten Ende sind die Kupferleiter an vollstabilisierte Supraleiter angelötet, die zum Magneten führen. Da die Magnete beim Abschalten kurzgeschlossen werden, sind elektrische Überschläge auch im warmen Heliumgas nicht zu befürchten.

Bei der Konzeption des Kryostaten wurde auch die Möglichkeit erwogen, statt eines LN_2 -Schildes ein Heliumgas-gekühltes Schild zu verwenden. Die Option wurde vor allem wegen des geforderten automatischen und zuverlässigen Betriebes verworfen, der bei zwei unabhängigen einfachen Kühlkreisen leichter zu erreichen schien als bei einem komplizierten. Während des Betriebes stellte sich zudem heraus, daß das aufgrund thermischer Verluste über Aufhängungen und Superisolation des Kryostaten und Leitungssystems erzeugte kalte Heliumgas gerade ausreicht, um bei vollem Betriebsstrom die Stromzuführungen zu kühlen. Zusätzliche Verluste an LHe wären unumgänglich gewesen, wenn

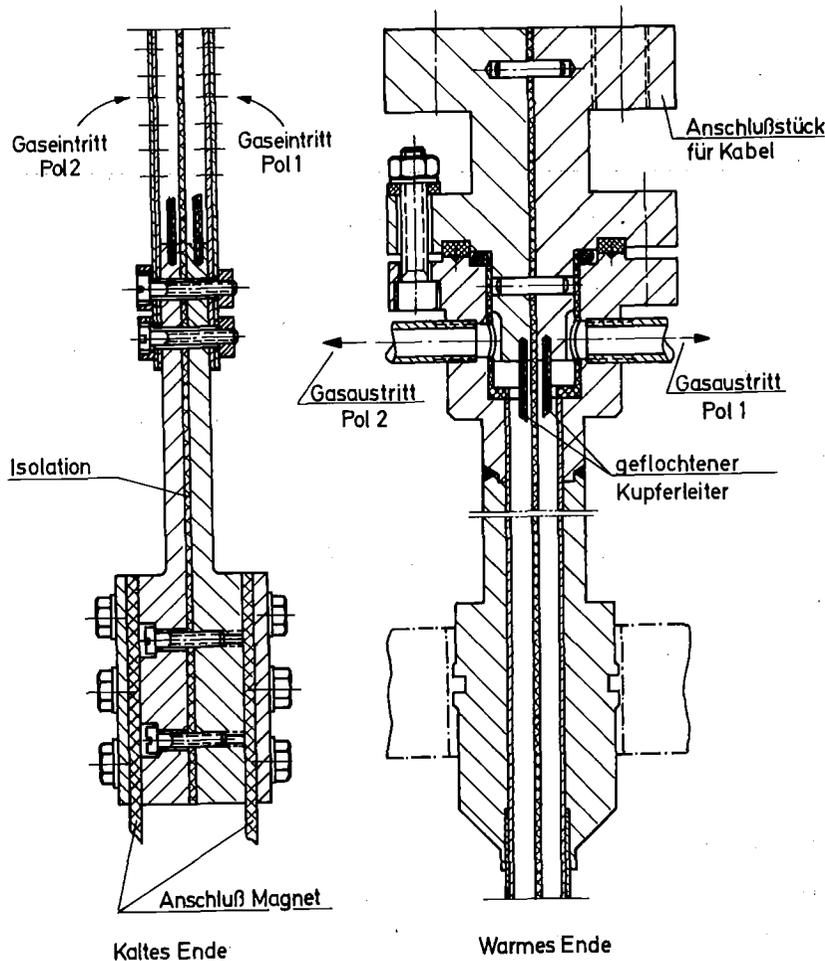


Abb. 5.3: Aufbau von oberem und unterem Ende der gasgekühlten Stromzuführungen

ein GHe-Schild verwendet worden wäre.

Beide Kryostate werden im Experimentierbetrieb bei CERN aus einer 500-l-Kanne mit LHe und einem 200-l-LN₂-Vorratstank versorgt. Dazu müssen etwa 20 m Versorgungsleitung bereitgestellt werden, um die Flüssigkeiten durch die Strahlungsabschirmung zu den Magneten zu transportieren. Eine gemeinsame Leitung für beide Flüssigkeiten wurde im KfK konzipiert und von der Fa. Stöhr, Augsburg, gebaut. In ihr dient LN₂ als Abschirmung für die LHe-Leitung. Das LHe wird in Abhängigkeit vom Füllstand im Reservoir über einen Verteilerkopf und zwei pneumatisch betätigte Ventile in den einen oder anderen Kryostaten geleitet. Die Regelung für den LN₂-Fluß erfolgt durch Solenoid-Ventile, wobei die Regelpunkte so

einjustiert werden müssen, daß die LHe-Leitung stets ausreichend gekühlt ist. Alle Regelventile befinden sich in einem zugänglichen Bereich außerhalb der Beton- und Eisenabschirmung.

6. Überwachungs- und Regelungssystem

Ein wesentlicher Gesichtspunkt der technischen Anforderungen von CERN war, daß der Betrieb der Quadrupole automatisch und, bis auf die Bereitstellung von LHe und LN_2 , unbeaufsichtigt ablaufen müsse. Es wurde deshalb von KfK ein Regelungs- und Überwachungssystem entworfen, das von der Fa. Linde, München, detailliert und gebaut wurde. Hauptbestandteil des Systems ist ein normierter 19"-Regelschrank, der sich in die elektronische Anlage des Hyperonen-experiments einfügt. Der Schrank enthält alle Anzeige- und Warngeräte für Betriebs- und Störbedingungen beider Magnete und des Kryoversorgungsteils. Störfälle werden durch Lampen und einen akustischen Alarm im Regelschrank signalisiert. In einigen Fällen wird dabei auch die Stromversorgung der Magnete unterbrochen. Die Meßwertgeber befinden sich an den Magneten selbst oder im ständig zugänglichen Bereich der Kältemittelversorgung.

In Anbetracht der besonderen Betriebsbedingungen der Magnete innerhalb einer unzugänglichen Strahlenabschirmung sind alle wesentlichen Kontrolleinrichtungen für Betrieb und Störfälle doppelt ausgelegt. Das gilt für die LHe-Standmessung in den Kryostaten mit je 2 Sonden (s. 6.1) und für die Potentialabgriffe zur Feststellung eines Quenches (s. 6.6) und zur Absicherung der Stromzuführungen (s. 6.5).

6.1 LHe-Stand in den Kryostaten

Die Standmessung erfolgt kontinuierlich mit einem Supraleiterdraht, der mit konstantem Strom so beaufschlagt ist, daß nur sein in die Flüssigkeit eingetauchter Teil supraleitend ist. Am Meßgerät für den Spannungsabfall an diesem Draht sind ein Maximum- und Minimumstand einstellbar, jenseits derer Störalarm gegeben wird. Bei Unterschreiten des Minimums wird zusätzlich die Stromversorgung des Magneten unterbrochen und über eine Diode kurz-

geschlossen. Die Regelung des LHe-Standes in den Kryostaten erfolgt über zwei weitere einstellbare Schaltkontakte, die über eine Relaisschaltung und Steuermagnetventile auf den pneumatischen Membranantrieb der LHe-Füllventile in der Zuführungsleitung wirken.

6.2 LN₂-Stand in den Kryostaten

Die Standmessung im LN₂-Strahlungsschild erfolgt über einen Punktfühler in Form eines Pt-100-Widerstandes. Das Meßsignal wird über eine spezielle Grenzwertkarte auf ein Relais geschaltet, das ein Solenoidventil im LN₂-Nachfüllkreis direkt ansteuert. Eine Mindestfüllzeit ist nach Öffnen des Magnetventils mit einem Zeitrelais einstellbar. Taucht der LN₂-Fühler nicht innerhalb einer einstellbaren Zeit wieder in die Flüssigkeit ein, so erfolgt eine Störmeldung. Bei der Wahl dieser Zeiten ist darauf zu achten, daß der Nachfüllvorgang von LN₂ genügend häufig erfolgt, um eine effektive thermische Abschirmung der LHe-Zuführungsleitung durch den durchströmenden Stickstoff zu gewährleisten.

6.3 Standmessung und Druckregelung in LHe- und LN₂-Vorratsgefäßen

Die Standmessung im 500-l-LHe-Dewar erfolgt ebenso wie in den Kryostaten kontinuierlich, wobei ein Minimumstand signalisiert wird. Der zum Nachfüllen erforderliche Druck im Dewar wird durch eine elektrische Heizung von ca. 50 Ω erzeugt, die von einem Druckschalter gesteuert wird. Heizstrom und Druck werden angezeigt. Wird der Minimum-Druckschaltpunkt innerhalb einer einstellbaren Zeit nicht wieder überschritten, erfolgt eine Alarmmeldung.

Am LN₂-Dewar sind Standanzeige (über kapazitive Sonden) und Druckaufbau (über einen Kaltvergaser) fest eingebaut und wurden von CERN mitgeliefert.

6.4 Temperaturregelung der Stromzuführungen

Am warmen Ende der Stromzuführungen ist ein Platinthermometer angebracht, welches über eine elektro-pneumatische Regeleinheit (Fabrikat Isopneu der Fa. Siemens) auf ein Stellventil wirkt, das den He-Gasstrom über die Stromzuführungen reguliert. Soll- und Ist-Temperatur der Stromzuführungen werden am Regler angezeigt. Beim tatsächlichen Betrieb der Magnete in CERN stellte sich heraus, daß dieser Regelkreis aus zwei Gründen nicht benötigt wird: zum einen ist der gesamte anfallende Heliumgasstrom gerade ausreichend, um die Stromzuführungen zu kühlen, so daß kein Regelbereich verbleibt; zum anderen ist die Regelgeschwindigkeit so klein, daß während des Regelns der Widerstand und damit die Spannung an den Stromzuführungen einen Grenzwert überschreiten können, der zum Alarm führt und die Stromversorgung der Magnete ausschaltet (s. 6.5).

6.5 Sicherung der Stromzuführungen

Eine der am stärksten gefährdeten Komponenten des Magnetsystems sind die Stromzuführungen, in denen jeder Pol aus einem bezüglich Wärmeeinströmung und Joulescher Verluste optimierten Leiter aus Kupfergeflecht (s. Abb.5.3) besteht, der durch das abströmende Helium-Gas gekühlt wird. Ein Ausfall dieses Gasstroms, etwa des durch nur einen Pol einer Stromzuführung hindurchtretenden, führt zu Überhitzung und Durchbrennen dieses Pols. Zum Schutz sind zwei unabhängige Sicherungen vorgesehen. Der Spannungsabfall in jedem Pol wird durch Potentialabgriff am warmen und kalten Ende gemessen und im Steuerschrank angezeigt. Durch Vergleich mit dem augenblicklichen Betriebsstrom wird der Widerstand jedes Pols erhalten, der wiederum ein Maß für die mittlere Temperatur des Pols ist. Oberhalb eines Maximums der Spannung, das für jeden Betriebsstrom per Hand einzustellen ist, wird die Stromversorgung ausgeschaltet.

Unabhängig davon wird die Temperatur des warmen Endes an der Steckverbindung zum Versorgungskabel mit Bimetalltemperaturschaltern überwacht, die die Stromversorgung oberhalb einer Temperatur von etwa 60°C ausschalten. Mit dieser Überwachung wird gleichzeitig ein Ausbrennen der Steckverbindung durch möglichen schlechten Kontakt ausgeschlossen.

In der Praxis erwies sich die Spannungsüberwachung der Pole als empfindlichste Schutzmaßnahme. Sie reagiert so schnell, daß sie schon während der Regelschwankungen des Kühlgasreglers (s. 6.4) anspricht. Wegen des insgesamt geringen Anfalls von He-Gas wurde deswegen auf den Betrieb des Reglers verzichtet. Eine Vereisung des warmen Endes der Stromzuführungen bei höherem He-Gasanfall, z.B. beim Nachfüllen von LHe, wird durch Einsatz eines Ventilators vermieden, der vom zugänglichen Bereich aus an den Versorgungssteil der Quadrupole gebracht werden kann.

6.6 Sicherungen im Quenchfall

Ähnlich wie bei den Stromzuführungen ist auch die Sicherung der Magnete für den Quenchfall (Normalleitendwerden des Supraleiters) mit zwei unabhängigen Kreisen ausgeführt. Mit dem im KfK entwickelten Quenchindikator wird dieser Störfall auf elektrischem Wege ermittelt. Die Potentialdifferenzen der beiden Enden jedes Quadrupols gegenüber einem Mittelabgriff werden verglichen und für den Betriebsfall auf 0 abgeglichen. Tritt in einer Hälfte eines Magneten ein durch Quench ausgelöster Ohmscher Widerstand auf, so wird der Spannungsabfall benutzt, um die Stromversorgung auszuschalten. Die Quenchindikatoren dürfen nicht überempfindlich eingestellt sein, damit sie das System nicht schon bei einem Flußsprung im Supraleiter ausschalten, der mit Energiedissipation verbunden ist und damit einem Ohmschen Widerstand entspricht.

Die zweite Sicherung wirkt über die Thermalisierung der im Magneten gespeicherten Energie im Quenchfall. Der sich erwärmende Magnet bringt das LHe zum Verdampfen, so daß der Druckanstieg über ein Manometer festgestellt werden kann, das oberhalb eines einstellbaren Maximums Alarm auslöst und die Stromversorgung ausschaltet. Diese Druckdetektion bedeutet gleichzeitig eine Anzeige anderer Störfälle, die zum Verdampfen des LHe führen, etwa eines Vakuumszusammenbruchs. Einen weiteren Schutz der Magnete im Quenchfall stellt die von CERN bereitgestellte Stromversorgung dar, die bei maximal 5 V arbeitet und deshalb keinen Strom zuläßt, der den normalleitend gewordenen Magneten gefährden könnte.

6.7 Überdrucksicherung der Kryostate

LHe- und LN₂-Raum der Kryostate sind mit Überdruckventil (3.2 bar) bzw. Berstscheibe (4 bar) gegen Überdruck gesichert. Diese Sicherungen befinden sich im zugänglichen Bereich etwa 4 m oberhalb der Versorgungsteile der Kryostate und sind mit diesen über Rohre von 50 mm NW verbunden.

7. Tests der Magnete und Kryostate

Die Funktionstüchtigkeit der Magnete und Kryostate wurde nach ihrer Fertigstellung und vor Lieferung nach CERN in einzelnen und gemeinsamen Tests ermittelt. Die Kryoversorgungsleitungen und der Überwachungs- und Regelschrank wurden unter simulierten Betriebsbedingungen in den Firmen überprüft, in denen sie gefertigt worden waren.

7.1 Test der Magnete

Die Magnettests wurden im Kryostaten des D2A-Experiments [6, Abs. IV-1] vorgenommen, weil diese Anlage mit den Refrigeratoren des KfK direkt verbunden ist und weil dadurch der Test der Kryostate gleichzeitig erfolgen konnte. Der Abkühlvorgang der Quadrupolmagnete wurde mit Pt- und Kohle-Widerstandsthermometern überwacht. Der elektrische Widerstand jedes Magneten wurde in Abhängigkeit von der Temperatur (Abb. 7.1) ermittelt, so daß in der eigentlichen Anlage keine Temperaturmeßgeräte eingebaut zu werden brauchten.

Während des Probetriebes der Magnete mit Strom ergab sich eine ausgeprägte Trainingsphase (Abb. 7.2), während derer die Magnete weiter unterhalb des nach Abb. 2.3 zu erwartenden kritischen Stromes normalleitend werden, also quenchen. Der Quenchstrom erhöht sich im Mittel nach jedem Normalleitungsübergang, bis schließlich der Betriebsstrom oder sogar der Kurzprobenstrom erreicht werden. Die Ursachen dieses Trainingsverhaltens sind trotz weltweiter Untersuchungen in den letzten 10 Jahren noch nicht abschließend geklärt. Mit größer werdenden Magneten wird das Trainieren sehr kostspielig, weil mit der Thermalisierung der magnetischen Energie beim Quench große Mengen LHe verdampft werden.

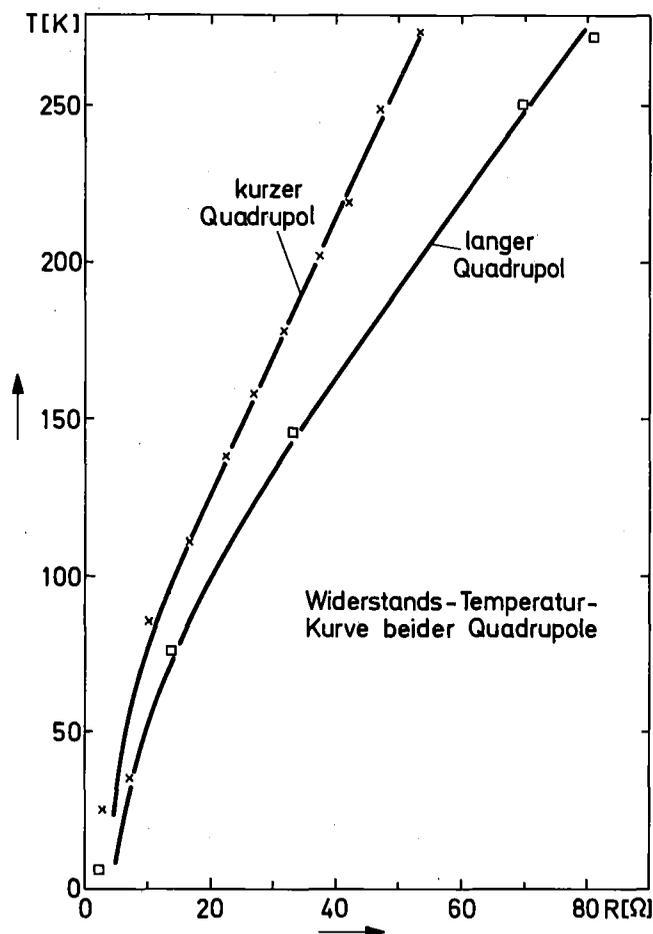
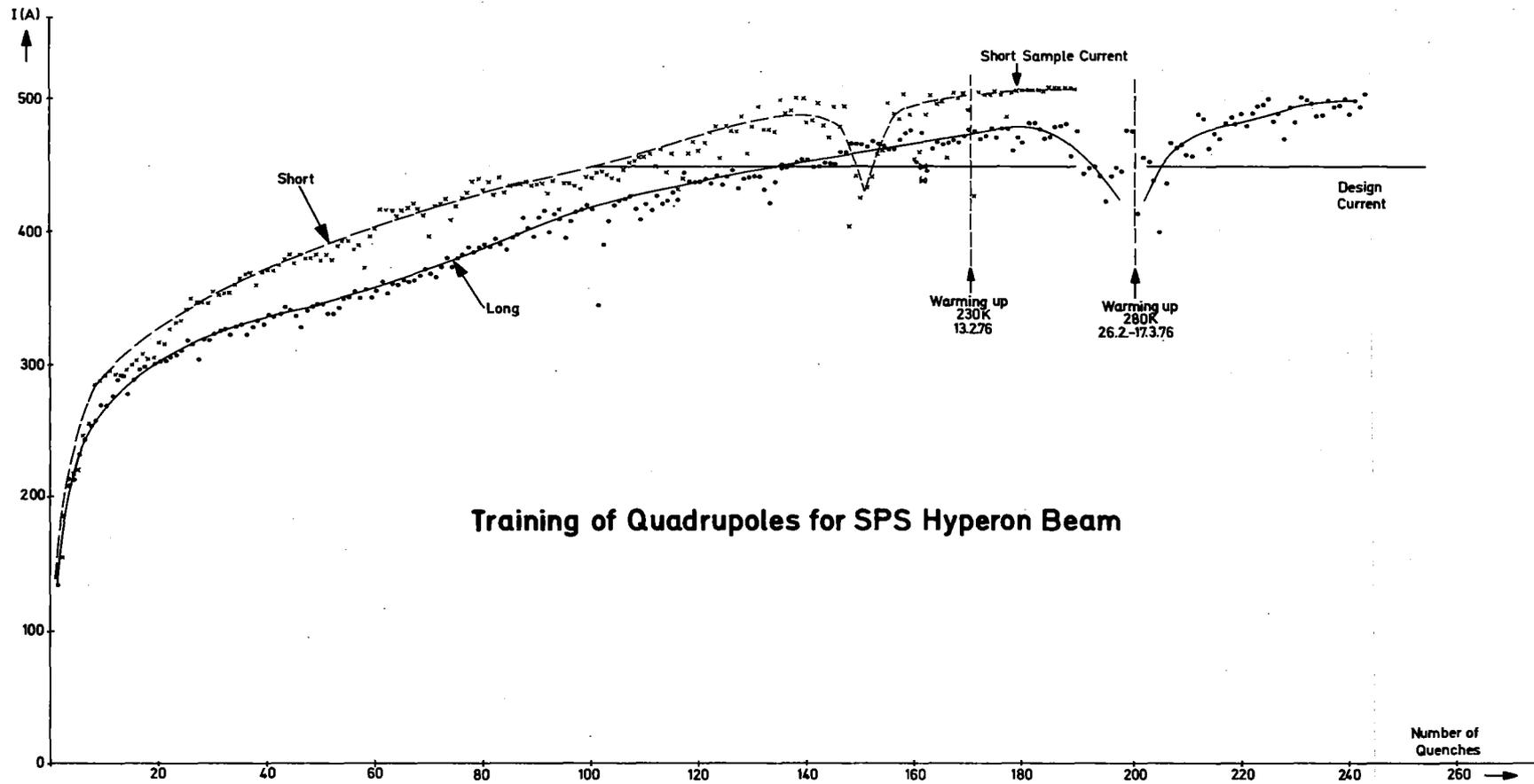


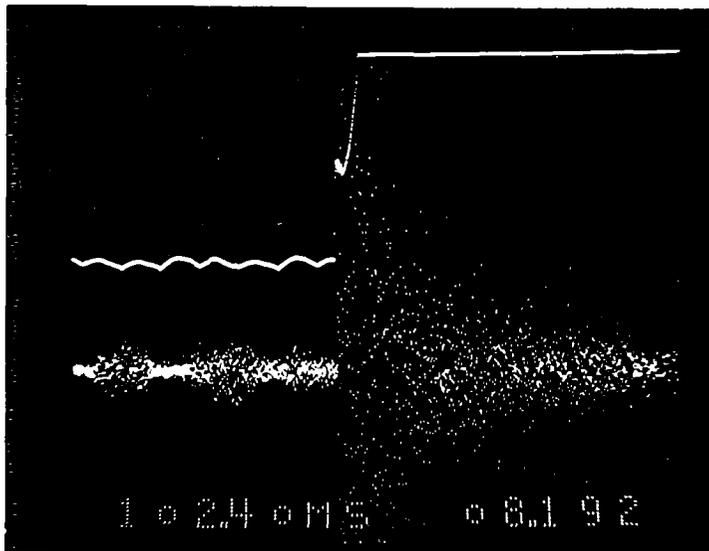
Abb. 7.1:
Elektrischer Widerstand
beider Quadrupole als Maß
für ihre Temperatur

Für die Quadrupole waren trotz des geringen Anteils von Epoxydharz in den Wicklungen und der restlichen Magnetstruktur mehr als 150 Quenche erforderlich, bis der Kurzprobenstrom erreicht wurde. Die Zahl der Trainingsschritte, die bis zu einem bestimmten Stromwert nötig ist, ist etwa proportional zur Länge der Quadrupole. Es ist damit unwahrscheinlich, daß die Enden der Wicklungen für das Training verantwortlich sind, obwohl in ihnen das höchste Magnetfeld herrscht. Vielmehr erscheint es möglich, daß vorzeitige Quenche durch Flußsprünge im Supraleitermaterial selbst hervorgerufen werden. Diese Hypothese wird gestützt durch Oszillographenbilder der Spannung am Quenchdetektor (Abb. 7.3), die beim Training vor jedem Quench einen abrupten Spannungsanstieg zeigen, wie er bei Flußsprüngen auftritt. Als Erklärung wird die Existenz sehr harter Ausscheidungen innerhalb des supraleitenden Drahtes postuliert, an denen die Filamente in unzulässiger Weise gedehnt werden |8|.



Training of Quadrupoles for SPS Hyperon Beam

Abb. 7.2: Vorzeitiges Quenchen der Quadrupole vor Erreichen des kritischen Stromes

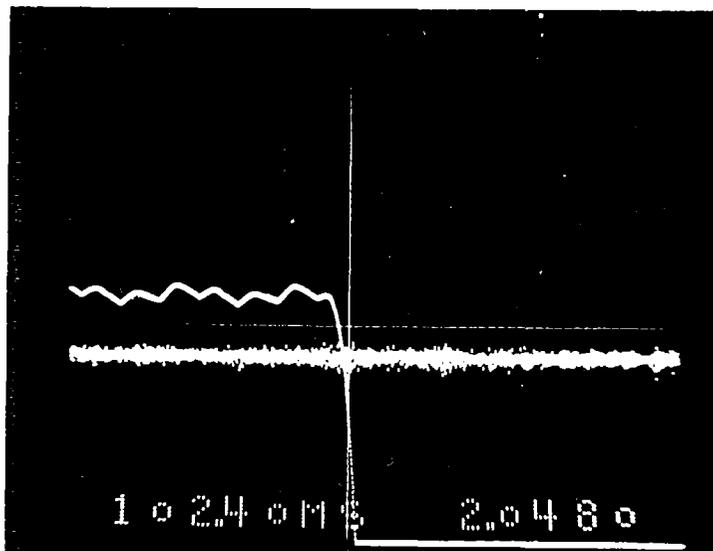


obere Kurve:
Spannungssignal

untere Kurve:
Schallsignal eines
Mikrophons

Abb. 7.3: Verlauf der nicht-induktiven Spannung
bei einem Quench in der Trainingphase

Bei Quenchen im Bereich des Kurzprobenwertes fehlt der abrupte Spannungsanstieg (Abb. 7.4).



schmale Kurve:
Spannungssignal

breite Kurve:
Schallsignal

Abb. 7.4: Verlauf der nicht-induktiven Spannung bei
einem Quench durch Erreichen des kritischen
Stromes

Nach der Trainingphase erreichten beide Quadrupole ihren Kurzprobenstrom von etwa 500 A. Beim Betriebsstrom von 450 A konnten sie schon in dieser Phase über Stunden ohne Störung betrieben werden. Der erreichbare Maximalstrom erwies sich als unabhängig von der Auferregungszeit, die bis auf 30 Sekunden reduziert wurde.

Während der Tests im D2A-Kryostaten wurden provisorische Feldmessungen mit feststehenden Induktionsspulen durchgeführt, deren Spannung während der Erregung der Magnete integriert wurde. Innerhalb einer Meßgenauigkeit von ca. 1 %, durch Lageungenauigkeiten der Meßspulen und Drift der Integratoren verursacht, ergab sich in beiden Quadrupolen volle Übereinstimmung mit Berechnungen nach MAGNET sowohl bezüglich des radialen Feldanstieges als auch der azimuthalen Symmetrie.

7.2 Tests der Kryostate

Parallel zu den Testläufen mit den Quadrupolen im D2A-Kryostaten wurden die Kryostate zusammengebaut und auf ihre Betriebs-eignung untersucht. Unter der Annahme von Wärmeleitung durch die Stützringe zwischen LHe- und LN₂-Zylindern und Strahlungsverlusten durch die Superisolation waren Verluste von etwa 1 W je Kryostat abgeschätzt worden. Der Wärmeeinstrom durch den Versorgungsteil ist wegen des abströmenden Helium-Gases vernachlässigbar klein. Die Verluste wurden sowohl mit einer Gasuhr für das aufgewärmte Helium-Gas als auch durch Messung der Helium-Standabnahme ermittelt. Es ergaben sich 1,1 W für den langen und 0,6 W für den kurzen Kryostaten. Das Isolationsvakuum war besser als 5×10^{-7} bar, die Leckrate kleiner als 10^{-9} mbar · l/s. Die Differenz der Verlustraten zwischen beiden Kryostaten wird mit unterschiedlichen Wärmekontakten zwischen Stützringen und Auflageflächen erklärt.

Die Verlustmessungen wurden nach Einbau der Quadrupole in die Kryostate bei Betriebsbedingungen wiederholt. Bei einem Strom von 450 A ergaben sich Verluste von 4,2 W in einem Kryostaten, ein Wert, der innerhalb der Anforderungen liegt (max. 15 l/h LHe-Verlust im Gesamtsystem).

Im Quenchfall wird die gesamte magnetische Energie in den Wicklungen thermalisiert (32 kJ beim kurzen, 42 kJ beim langen Kryostaten), so daß das LHe verdampft. Die Wärmeabgabe an das LHe erfolgt innerhalb von etwa 30 Sekunden, obwohl der Quench selbst in einigen Sekunden abläuft. Offenbar wird die Wärmeübertragung durch den kompakten, blockartigen Aufbau der Wicklungen gedämpft. Der Druckanstieg im Kryostaten bleibt damit gering und unterhalb von 2 bar, so daß weder das Überdruckventil in der zusätzlichen Sicherheitsleitung anspricht (3,2 bar) noch der Auslegungsdruck des LHe-Tanks von 5 bar erreicht wird.

Beide Kryostate mit Magneten konnten in etwa 12 Stunden von Zimmertemperatur auf 4,2 K abgekühlt werden. Für den kurzen Magneten wurden dafür 350 l LHe verbraucht. Das ist etwa um einem Faktor 2,6 mehr als die 136 l LHe, die der Enthalpie der abzukühlenden Massen entsprechen und damit das theoretische Minimum an LHe-Verbrauch darstellen [9]. Ähnliche Verhältnisse zwischen tatsächlichem und minimalem theoretischen Verbrauch von LHe zum Abkühlen sind auch in anderen kryogenen Systemen des KfK gefunden worden. Aufgewärmt wurden die Magnete innerhalb von 5 bis 8 Stunden mit einer Kombination von elektrischer Heizung durch die Magnetwicklungen (max. 1 kW unterhalb 10 Ω Spulenwiderstand bzw. max. 100 V Spannung an den Klemmen der Stromzuführungen) und Einbringen von Stickstoffgas in das Isoliervakuum (einige Torr oberhalb ca. 100 K Magnettemperatur).

Beide Magnete wurden während der Tests mehrere Male thermisch gezykelt. Dadurch wurde demonstriert, daß die erreichbaren Betriebsbedingungen (maximaler Spulenstrom bzw. Dichtigkeit und Verlustrate der Kryostate) durch Auf- und Abwärmen nicht verschlechtert werden. Zur Justierung der Quadrupole im Hyperonenstrahl sind auf dem äußeren Vakuumgefäß Zielmarken angebracht, mit denen sich ihre magnetische Achse auf ± 1 mm genau bestimmen lassen muß. Da die Zielmarken bei Zimmertemperatur des Magneten angebracht wurden, mußte die Verschiebung der magnetischen Achse gegenüber dem Vakuumtank beim Abkühlen ermittelt werden. Ein Fluchtfernrohr wurde am Vakuumtank befestigt, mit dem eine Ziel-

marke an jedem Ende des zentralen Tragrohres beobachtet wurde. Dabei ergaben sich zunächst nichttolerierbare und nichtreproduzierbare Verschiebungen von bis zu 4 mm zwischen Tragrohr und Vakuumtank während der thermischen Zyklen. Sie verringerten sich auf weniger als 0,5 mm, nachdem die GFK-Stützringe zwischen den horizontalen Tanks des Kryostaten, die auf dem Umfang zunächst geschlitzt worden waren, durch ungeschlitzte Stützringe ersetzt worden waren. Eine merkliche Vergrößerung der thermischen Verluste war mit dieser Maßnahme nicht verbunden.

8. Magnetfeld-Messung

Da beide Quadrupolmagnete konstruktiv identisch sind, wurde nur das Feld des kürzeren exemplarisch mit rotierenden Induktionsspulen hoher Genauigkeit vermessen. Meßprinzip und Meßapparatur werden in groben Zügen vorgestellt. Die zitierten Meßergebnisse beschränken sich auf solche Feldmerkmale, die in den Spezifikationen für den Magneten definiert sind. Eine vollständige Analyse der für Präzisions-Feldmessungen konzipierten Apparatur und aller Meßergebnisse wird noch veröffentlicht [10].

8.1 Meßprinzip

Als Feldsonden werden rotierende Induktionsspulen verwendet. Die Entscheidung zugunsten dieses Sondentyps beruht auf den meßtechnisch wirksamen Randbedingungen:

- hoher Feldgradient bei geringem Aperturdurchmesser, d. h. hohes Ortsauflösungsvermögen des Meßsystems;
- kalte Bohrung, d. h. bekannte Signal-Feld-Relation bei LHe-Temperaturen.

8.1.1 Meßsignalinterpretation

Die Meßwertinterpretation wird bei Induktionsspulen von keinerlei äußeren Eichfaktoren erschwert. Sie wird ausschließlich bestimmt von der Geometrie der Spule und ihrer Relativbewegung zum Feld.

Aus den geometrischen Daten der Querschnittsstruktur einer Spule können für jede physikalisch zulässige Feldentwicklung generelle Gewichtsfaktoren Q_n berechnet werden, die die absolute Stärke des Feldentwicklungskoeffizienten B_n im Gesamtfluß \emptyset und damit im Induktionsspannungsintegral $\int U_{\text{ind}} dt$ ausdrücken (s. Formel (8.1)). Diese Separation von Spulen- und Feldvariablen gestattet durch geeignete Wahl der Spulengeometrie im Prinzip jede gewünschte relative Wichtung der Feldentwicklungskoeffizienten im Meßsignal.

Für eine 2-dimensionale Feldentwicklung nach harmonischen Funktionen entlang der magnetooptischen Achse z werden neben der Amplitude B_n auch die Phasen α_n von der Spulengeometrie beeinflusst. Die Gewichtsfaktoren Q_n und die ihnen zugeordneten Phasenfaktoren β_n sind transzendente Funktionen n -ten Grades in allen Spulenparametern. Für eine einlagige, symmetrische Rechteckspule können aus Abb. 8.1 die bestimmenden Parameter entnommen werden.

Mit Q_n und β_n als Funktion der Parameter $(\rho, d, b, h, a, \delta, \chi)$ können nach Fourier-Analyse des Induktionsspannungsintegrals bezüglich des Drehwinkels θ die Multipolamplituden $B_n(r)$ und -phasen α_n bestimmt werden nach

$$\int U_{\text{ind}} dt = \emptyset = \sum_n \emptyset_n = \sum_n Q_n \cdot B_n(r) \cdot \sin[n(\theta + \alpha_n + \beta_n)] \quad (8.1)$$

8.1.2 Sondensystem

Das Sondensystem besteht aus zwei langen einlagigen Rechteckspulen, einer Meßspule M und einer Kompensationsspule K , sowie zwei kurzen mehrlagigen Zylinderspulen Z_1 und Z_2 .

Mit M wird das Absolutfeld $\int B(r, \theta, z) dz$ bestimmt. Durch Signalkopplung der Spulen M und K kann der Quadrupolterm weitgehend kompensiert und das Restfeld $\sum_{n, n \neq 2} \int B_n(r, \theta, z) dz$ mit hoher Auflösung gemessen werden. Die beiden Zylinderspulen dienen zur lokalen 2-Punkt-Bestimmung der Drehachsenlage des Sondensystems relativ zur magnetooptischen Achse des Magneten.

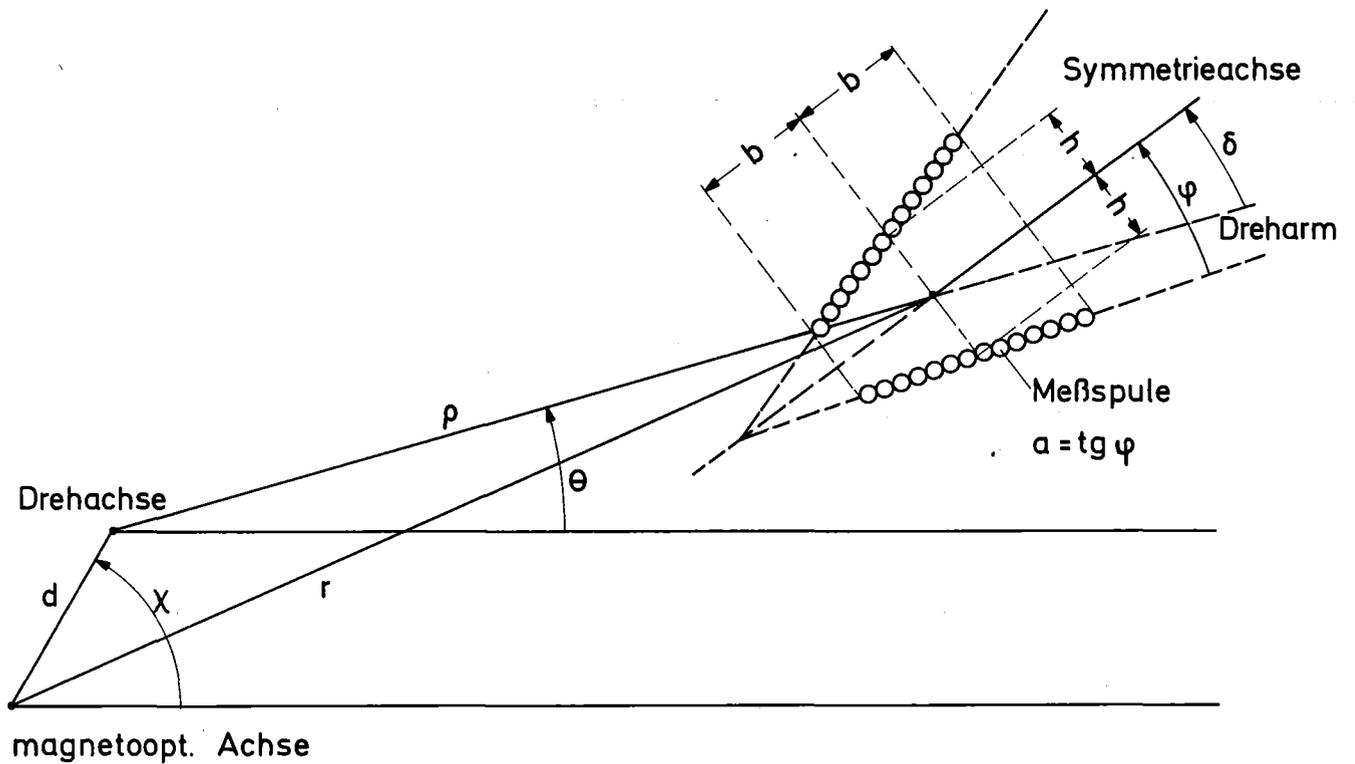


Abb. 8.1: Definition von Parametern, die die Gewichtsfaktoren rechteckiger Meßspulen bestimmen.

8.1.2.1 Rechteckspulen

Rechteckspulen liefern in 3dimensionalen Feldern nur dann ein dem Integral der Feldstärke $\int B(r, \theta, z) dz$ proportionales Meßsignal, wenn zwischen Ebenen $z = \text{konst.}$ gemessen wird, in denen $B_z(r, \theta, z)$ identisch verschwindet. Die Spulenlänge ist mit 900 mm so gewählt, daß zwischen der Magnetmittelebene und einer Ebene gemessen wird, die um etwa das 5fache des äußeren Spulendurchmessers außerhalb des Magneten liegt.

Die optimale Querschnittsstruktur ergibt sich als Kompromiß einer Reihe sich widersprechender Bedingungen.

a) Meßelektrische Bedingungen:

Meßspule: Messung des Absolutfeldes nahe am Sollkreis ($r = 15 \text{ mm}$) bei gleichzeitig großem Störspannungsabstand des Meßsignals.

Kompensationsspule: selektive Kompensation des Quadrupolterms.

b) Meßmechanische Bedingungen:

Rotierende Induktionsspulen liefern als Meßsignal eine Feldentwicklung entlang ihrer momentanen Rotationsachse. Jede Ortsinstabilität der Drehachse induziert in Gradientenfeldern zusätzliche Spannungsterme, die von den magnetischen Multipoltermen unterschieden werden müssen. Da lange Rechteckspulen nicht trägerfrei gewickelt werden können, werden sie sich bei horizontaler Einspannung, abhängig von Material und Geometrie des Spulenkörpers, durchbiegen.

Eine Optimierung der meßelektrischen Bedingungen allein hat zunehmende Unsymmetrie der Spulenquerschnittsstruktur zur Folge. Damit verbunden sind immer stärker differierende Flächenträgheitsmomente entlang der beiden Hauptträgheitsachsen der Querschnittsfläche, d. h. eine vom Rotationswinkel abhängige Durchbiegung, also Ortsinstabilität der Drehachse.

Unter Berücksichtigung aller Gesichtspunkte wurde schließlich die Querschnittsstruktur von Abb. 8.2 gewählt. Bei Variation der Querschnittsstruktur in z -Richtung ist der Rückschluß vom Meßsignal ϕ_n auf das Feld $\int B_n(r, \theta, z) dz$ nach

$$\phi_n = \int Q_n(z) B_n(r, \theta, z) dz$$

nicht eindeutig, auch wenn $Q_n(z)$ berechenbar bleibt.

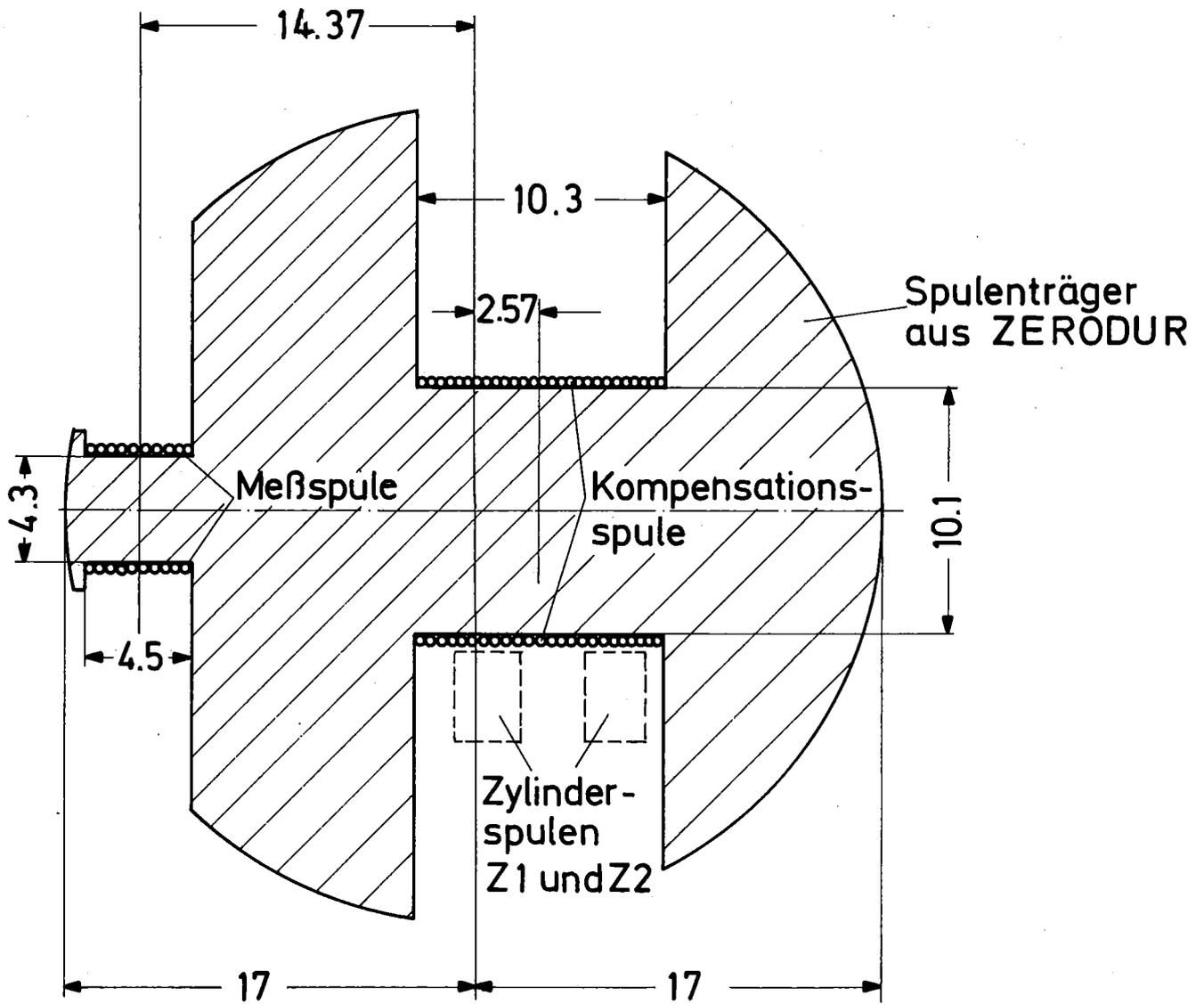


Abb. 8.2: Querschnittsstruktur des Meßarmes. Die Zylinderspulen befinden sich im vorderen und hinteren Drittel der Meßarmlänge.

8.1.2.2 Spulenkörper

Aus den Überlegungen des vorhergehenden Abschnitts ergeben sich folgende Bedingungen an das Spulenkörpermaterial:

- unmagnetisch,
- Verlauf der Dilatation bekannt bis He-Temperatur und kompatibel mit der des Spulenleitermaterials,
- nichtmetallisch (Wirbelstromverluste, Wärmeleitungsverluste),
- mechanisch präzise bearbeitbar,
- Verhältnis Elastizitätsmodul/spezifisches Gewicht möglichst groß.

Als geeignetes Material (neben Kohlefaser) erwies sich die von der Firma Schott, Mainz, hergestellte Glaskeramik ZERODUR. Der Spulenkörper wurde unter Bedingungen, wie sie in der optischen Industrie üblich sind, mechanisch bearbeitet (Firma Möller, Wedel), mit besonders eng toleriertem Kupferlackdraht einlagig bewickelt und im KfK genauestens vermessen [11]. Der Absolutfehler unterschritt in allen Abmessungen 20 μm .

8.1.2.3 Zylinderspulen

Das Sondensystem wird durch zwei Zylinderspulen (Dipolspulen 4. Ordnung) ergänzt, die das Feld in der Magnetmitte und gegen Magnetende analysieren. Aus der Amplituden- und Phasenrelation der Dipol- zur Quadrupolkomponente kann der Versatz der Drehachse bezüglich der magnetooptischen Achse nach Betrag und Richtung am Ort der Zylinderspulen berechnet werden. Durch entsprechende Feinjustierung des Magneten können beide Achsen auf ca. $\pm 5 \mu\text{m}$ zur Deckung gebracht werden.

8.2. Elektronik (Abb. 8.3)

Von der Elektronik wird erwartet, daß sie den Analogdatenstrom der Induktionsspulen mit einer Genauigkeit und Meßdichte erfaßt,

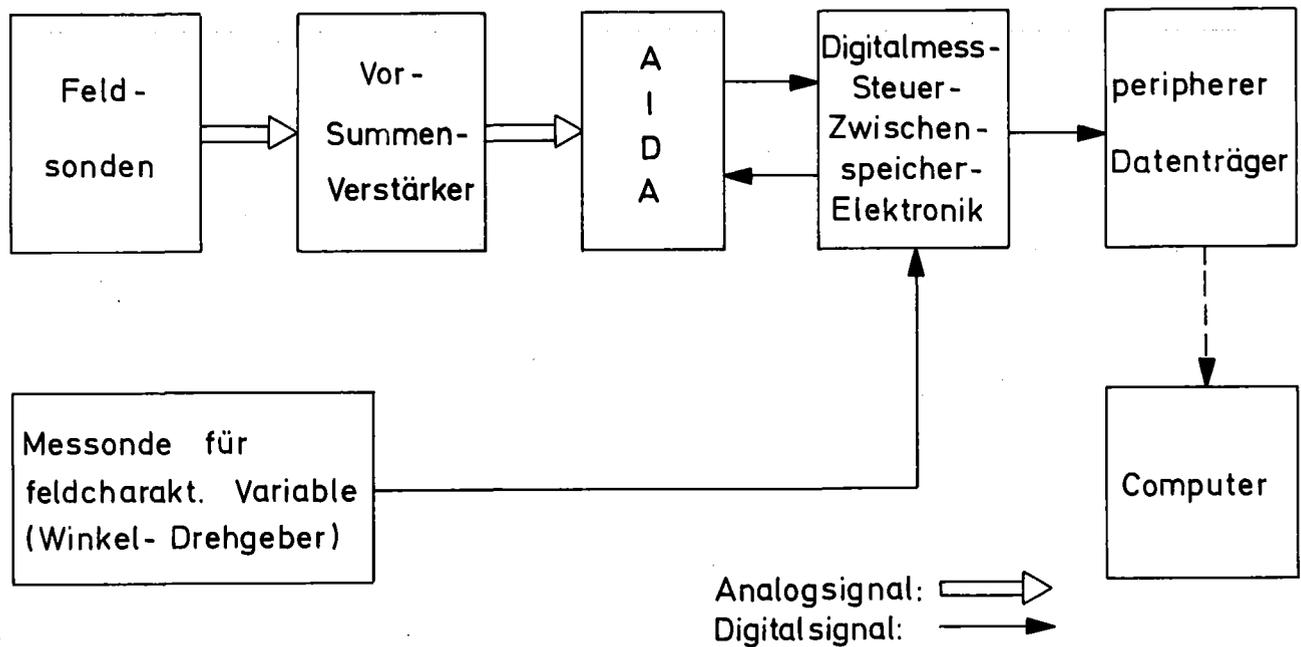


Abb. 8.3: Elektronisches Signalfluß-Schema

die nach Fit mit geeigneten Funktionssystemen eine kontinuierliche Interpretation des Induktionsspannungsintegrals mit einer Genauigkeit von etwa 10^{-5} full scale gewährleisten.

Die Aufzeichnung soll parallel in Abhängigkeit von einer feldcharakteristischen Variablen - wie Erregerstrom, Azimutalwinkel bei harmonischer Feldanalyse, Referenzfeld - und der Zeit, mit der die Schwingterme korreliert sind, erfolgen.

Die Induktionsspannung der jeweils aktiven Sonde wird nach hochohmiger Impedanztrennung zunächst konstant auf optimale Eingangspegel des Analog-Integrator- und Digitalschrittanalysators (AIDA) vorverstärkt. Der Momentanwert des im AIDA gebildeten

Zeitintegrals wird parallel und unabhängig nach zwei Modes abgefragt. Zusammen mit dem Wert der feldcharakteristischen unabhängigen Variablen und der Integrationszeit wird die Integratorausgangsspannung digitalisiert und zwischengespeichert. Nach Meßende wird der Speicherinhalt auf periphere Datenträger ausgegeben.

8.2.1 AIDA

Da mit kommerziellen Datenerfassungssystemen Genauigkeit und Meßgeschwindigkeit nicht gleichzeitig zu realisieren sind, wurde mit dem AIDA ein elektronisches Konzept verwirklicht, das innerhalb des als begrenzt voraussetzbaren Frequenz- und Amplitudenspektrums von Induktionsspannungen den gestellten Bedingungen genügt.

Das Konzept des AIDA (Abb. 8.4) beruht auf folgenden Merkmalen:

- Zellenstruktur durch Verwendung baugleicher Integrator-Komparator-Elemente,
- alternierende 2-Kanal-Integration,
- Festwert-Vergleichsspannungen,
- getrennte Integration positiver und negativer Eingangsspannungen,
- automatisch gesteuerte, schrittweise Nachverstärkung der momentanen Eingangsspannung.

Die wichtigsten Daten des AIDA:

- Integrationsgenauigkeit für jeden Meßbereich besser $\pm 3 \cdot 10^{-5}$
- statistische Genauigkeit der Einzelmessung für Eingangsspannungen im Niederfrequenzbereich und Amplituden zwischen 100 mV und 10 V $\pm 10^{-5}$
- minimaler Meßabstand ca. 2 ms
- Kurzzeitstabilität über Stunden besser $\pm 10^{-5}$

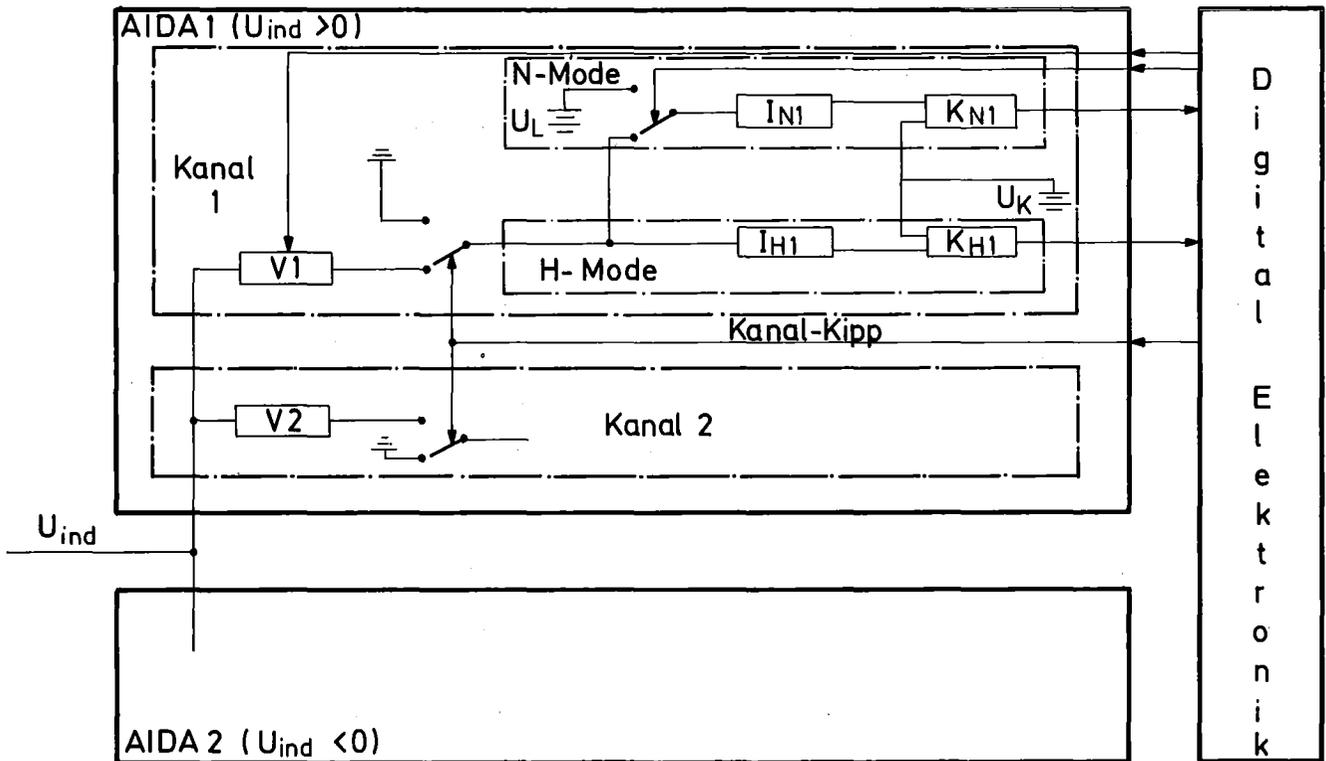


Abb. 8.4: Arbeitsprinzip des Analog-Integrator- und Digitalschrittanalysators AIDA
(V Verstärker, I Integrator, K Komparator)

8.2.1.1 Hauptkanal-Integrationsmode (H-Mode)

Im H-Mode wird das Integral $U_a(t)$ der Induktionsspannung in konstanten Ordinatenabschnitten ΔU_H über die abwechselnd aktiven Hauptintegratoren \int_{H1} bzw. \int_{H2} abgefragt. Sobald der Zuwachs der Integratorausgangsspannung des aktiven Kanals der konstanten Vergleichsspannung U_K entspricht, übernimmt der Parallelkanal automatisch die Integration. Der passive Kanal wird auf Null zurückgesetzt. Im Umschaltzeitpunkt werden neben Kanal- und Meßbereichskennungen der Momentanwinkel θ des Sondensystems und die Dauer des inkrementalen Zuwachses Δt gemessen.

8.2.1.2 Nebenkanal-Integrationsmode (N-Mode)

Im N-Mode wird das Induktionsspannungsintegral, das synchron zu den Hauptkanalintegratoren im jeweils aktiven Kanal über die Nebenintegratoren \int_{N1} bzw. \int_{N2} zur Verfügung steht, zu beliebigen, extern triggerbaren Zeitpunkten abgefragt.

Bei einer Feldanalyse nach harmonischen Funktionen wird als unabhängige Triggervariable zweckmäßigerweise der Drehwinkel des SONDENSYSTEMS gewählt und in äquidistanten Winkelabständen $\Delta\theta$ gemessen. Die Abstände sind so zu dimensionieren, daß bei diskreter Fourier-Analyse eine spektrale Auflösung bis zu maximal erwarteten Frequenzanteilen möglich ist.

Im Triggerzeitpunkt wird der Eingang des aktiven Nebenintegrators an eine Konstantspannung U_L geschaltet. Die Zeit des nun folgenden linearen Anstiegs der Nebenintegratorausgangsspannung bis U_K wird gemessen. Sie ist ein direktes Maß für den Momentanwert ΔU_N des Integrals zum Triggerzeitpunkt.

Abb. 8.5 demonstriert die Meßwerterfassung in beiden Moden.

8.2.1.3 Automatische Spannungsverstärkung der momentanen Induktionsspannung

In Bereichen abnehmender Feldstärkeänderung wachsen im H-Mode die Zeitabstände aufeinanderfolgender Messungen; die Informationsdichte nimmt ab.

Durch automatisch gesteuerte Nachverstärkung der momentanen Induktionsspannung über die Verstärker V_1 bzw. V_2 sinkt die für eine H-Mode-Messung notwendige Feldänderung ΔB umgekehrt proportional zur momentanen Verstärkung.

8.2.1.4 Zerlegung des Induktionsspannungsintegrals

Der Hub ΔU_H und die Relation $\Delta U_N = \Delta U_N(\Delta t_n)$ werden in separaten Eichläufen des AIDA für jeden Integrationskanal v (je zwei für positive und negative Induktionsspannungen) und jeden Nachver-

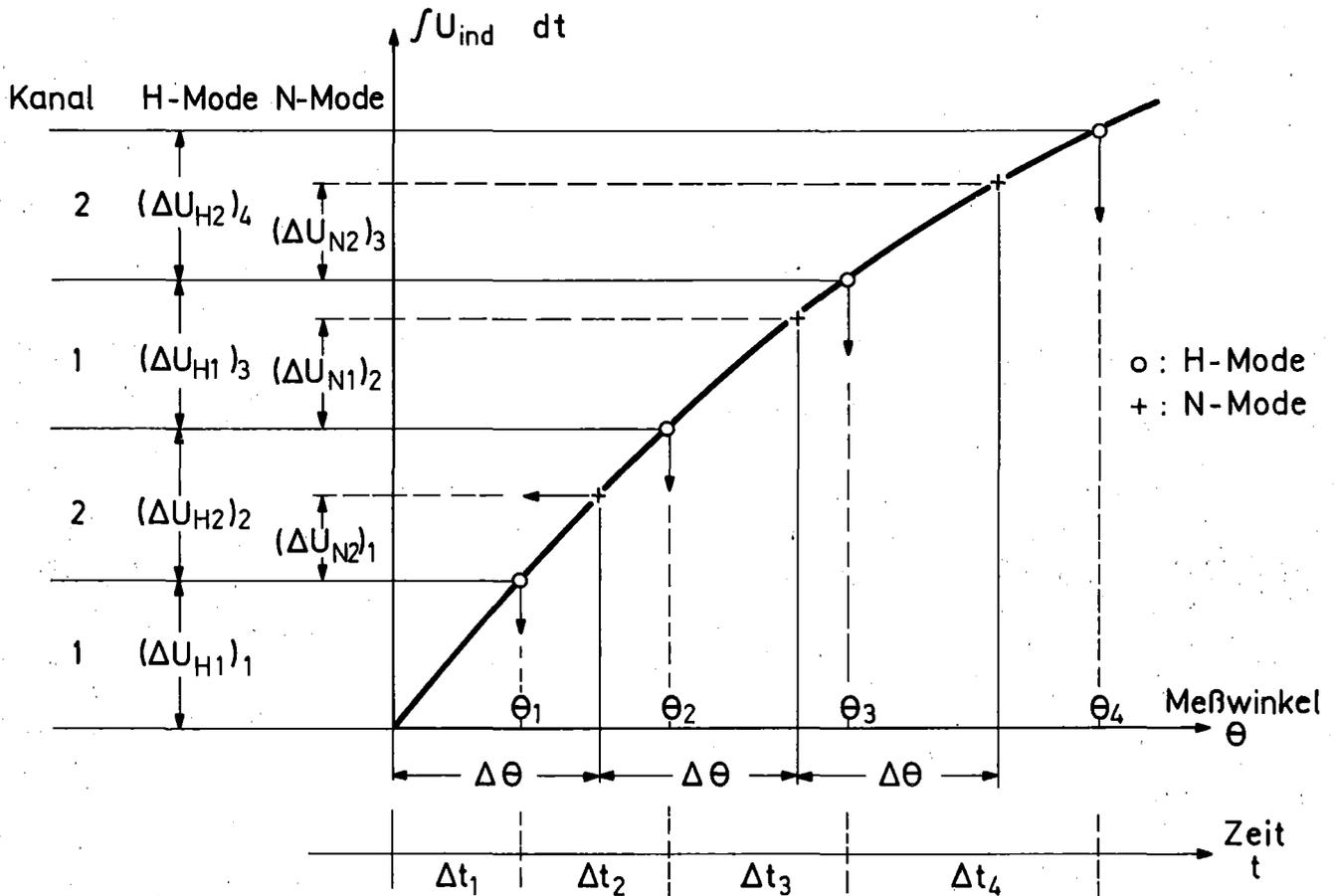


Abb. 8.5: Prinzip der Meßdatenerfassung im Haupt- und Nebenkanaalmode

stärkungsfaktor μ (z. Z. je vier pro Kanal) in geeigneten Abständen gemessen.

Für Korrekturen, die die zitierte Linearität des Hubs von $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ innerhalb jedes Meßbereiches übertreffen, wird der Hub als Funktion konstanter Eingangsspannungen und der zugehörigen Integrationszeiten gemessen.

Für einen N-Mode-Winkel $n \cdot \Delta\theta$, dessen Messung in das k -te H-Mode Intervall fällt, ergibt sich als Gesamtintegral der Induktionsspannung

$$U_a(n \cdot \Delta\theta) = \int_0^{\sum_{i=1}^n \Delta t_i + \Delta t(\Delta\theta_n)} U_{ind} dt = \sum_{i=1}^k \Delta U_H(v_i, \mu_i) + \Delta U_N(\Delta t_n, v_n, \mu_n)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \nu &= 1, 2, 3, 4 \\ \mu &= 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (8.2)$$

8.2.2 Digital-Elektronik

Hauptaufgaben der Digitalelektronik sind:

- Steuer- und Überwachungsfunktionen für den AIDA,
- Messung der Integrationszeiten auf $\pm 10\text{ns}$ genau,
- Digitalisierung des optisch abgetasteten Drehwinkels (Drehgeber ROD7, Firma Heidenhain, Traunreut) mit einer Auflösung von $1/1000^\circ$,
- Zwischenspeicherung und Ausgabeüberwachung der Meßwerte.

Daneben sind zwei Steuer-Moden für die automatische Nachverstärkung der Eingangsspannung vorgesehen:

Für langsam veränderliche Felder, deren Induktionsspannung über mehrere Meßintervalle in einen Meßbereich fällt, wird die Nachverstärkung geändert, wenn die Integrationszeit aus dem vorgegebenen Meßbereich läuft.

Für schnell, aber annähernd reproduzierbar variierende Feldstärken (Kompensationsmessung) wird in einem der eigentlichen Messung vorausgehenden Lauf die optimale Verstärkung automatisch gesucht und für die Messung vorprogrammiert.

8.3 Mechanik

Eine Spektralzerlegung des Meßsignals entspricht nur dann einer Feldentwicklung nach Multipoltermen, wenn die mechanischen Komponenten der Meßapparatur (Abb. 8.6) bestimmten Bedingungen genügen:

- vibrations- und torsionsfreier Rotationsantrieb des Sondensystems,
- Entkopplung des Meßsystems von äußeren, mechanischen Störfrequenzen,

- Justierlemente, mit denen die virtuelle Achse des Antriebes, die virtuelle magnetooptische Achse und die geometrische Längsachse des Spulenkörpers zur Deckung gebracht werden können.

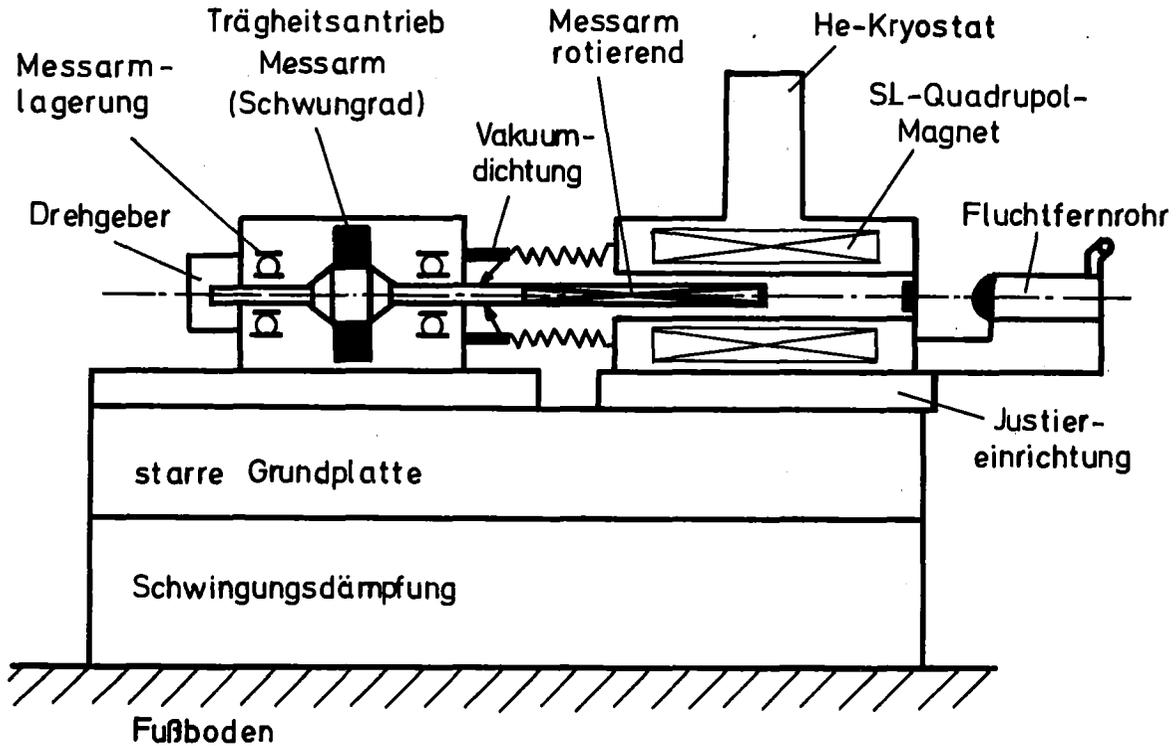


Abb. 8.6: Mechanischer Aufbau der Meßapparatur

Schwungradantrieb, schwimmender Meßaufbau, flexible Vakuumdrehdurchführungen und diverse Justier- und Kontrollelemente reduzieren die mechanisch bedingten Fehlerquellen auf kontrollierbare und korrigierbare Größenordnungen:

- Translationsamplitude am freien Ende des Sondensystems $\lesssim 2\mu$,
- Torsionsamplitude des Spulenkörpers gegenüber dem Drehgeber $\lesssim 2/1000^\circ$,
- Durchbiegen der neutralen Faser des Spulenkörpers $(40 \cdot \sin 20 \pm 2)\mu$,
- Parallelität zwischen Rotations- und magnetooptischer Achse $< \pm 5\mu$.

Eine ausführliche Beschreibung des mechanischen Aufbaus liegt vor |12|. Abb. 8.7 zeigt die Feldmeßapparatur mit einem Quadrupol.

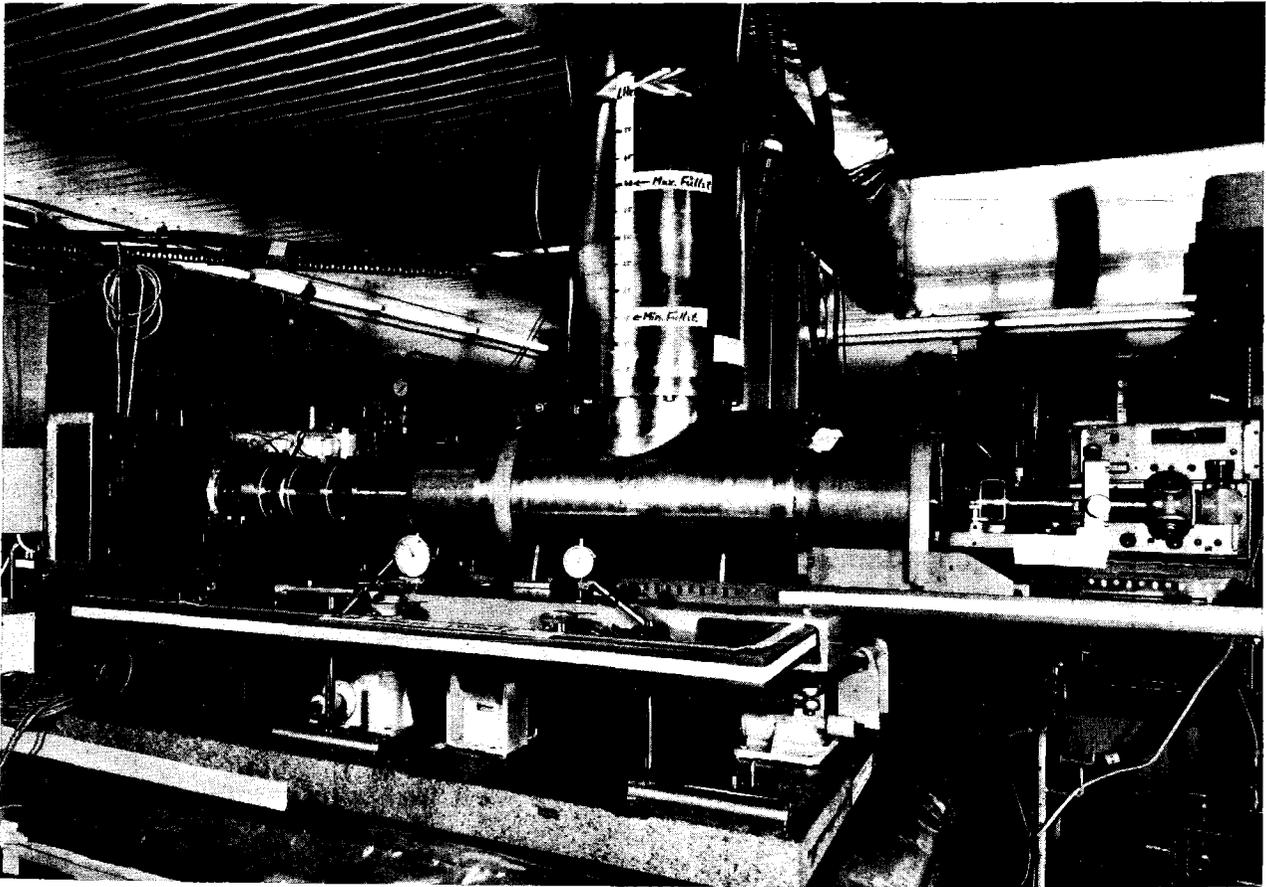


Abb. 8.7: Magnetfeldmeßapparatur während des Betriebes

8.4 Meßergebnisse

Die parallele Aufzeichnung von Meßwinkel und Integrationsdauer ermöglicht getrennte Fourier-Analysen der Meßkurve in Abhängigkeit vom Winkel und der Zeit. Unterstützt durch die Abnahme der Rotationsfrequenz des Sondensystems über mehrere Umläufe gelingt eine gute Separation der winkelkorrelierten Komponenten von den zeitkorrelierten Schwingtermen im Meßsignal:

$$\int U_{\text{ind}} dt = \sum_n U_n \sin(n\theta + \alpha_n) + \sum_{\omega_i} U_{\omega_i} \sin(\omega_i t + \alpha_i) \quad (8.3)$$

Bei einer Auflösung von $3 \cdot 10^{-5}$ können Multipolterme der Ordnungen $n = 2$ bis $n = 11$ nachgewiesen werden. Die rein magnetischen Terme sind dabei überlagert von ebenfalls mit 2π periodischen Termen, die durch Bewegung der momentanen Drehachse auf einer geschlossenen Ortskurve (z. B. durch Lagerunwucht verursacht) im Gradientenfeld des Magneten induziert werden. Beide Anteile können nur bei Messung auf verschiedenen Radien unterschieden werden. Bei der gegebenen Gradientenfeldstärke übersteigen bereits durch Unwuchten im μm -Bereich induzierte Anteile die magnetischen Komponenten.

8.4.1 Symmetriefehler

Die relative Stärke der Termamplituden $n = 3, 4, \dots, 9, 11$ beträgt bei $r = 15$ mm

$$\int_{-\infty}^{+\infty} B_n(r, z) dz / \int_{-\infty}^{+\infty} B_2(r, z) dz < 5 \times 10^{-4},$$

wobei die einzelnen Amplituden und Phasen stromabhängig, aber reproduzierbar, innerhalb dieser Größenordnung variieren. Dies deutet auf vernachlässigbare Geometrieschwankungen der Quadrupolsymmetrie des Magneten hin. Die absolute Größe der Terme ist für konkrete Hinweise auf Geometriefehler zu gering.

8.4.2 Ikosapol

Für den $n = 10$ -Pol können für Amplitude und Phase die Designwerte bestätigt werden. Bei $r = 15$ mm gilt:

$$\int_{-\infty}^{\infty} B_{10}(r, z) dz / \int_{-\infty}^{\infty} B_2(r, z) dz \approx 3 \text{ } ^{\circ}/\text{oo},$$

$$\alpha_{10} = \alpha_2 + (18 \pm 0,005)^{\circ}.$$

Die Summe aller Feldfehler liegt über dem gesamten Strombereich und innerhalb einer Apertur von 15 mm Radius unterhalb von 6×10^{-3} der Quadrupolamplitude.

8.4.3 Stromabhängigkeit von Gradient und Fokussierungsstärke

Der 2dimensionale Gradient bzw. die 3dimensionale Feldstärke (Fokussierungsstärke) sinken mit steigender Erregung infolge wachsender Sättigung des Eisenzyllinders um 1,2 bis 1,5 %, in guter Übereinstimmung mit den MAGNET-Rechnungen, in denen eine Abnahme des Gradienten zwischen ungesättigt angenommenem und gesättigtem Eisen um 1,3 % vorausgesagt worden war. In Abb. 8.8 werden Gradient und Feldstärke auf Nennstromstärke von 445 A normiert angegeben.

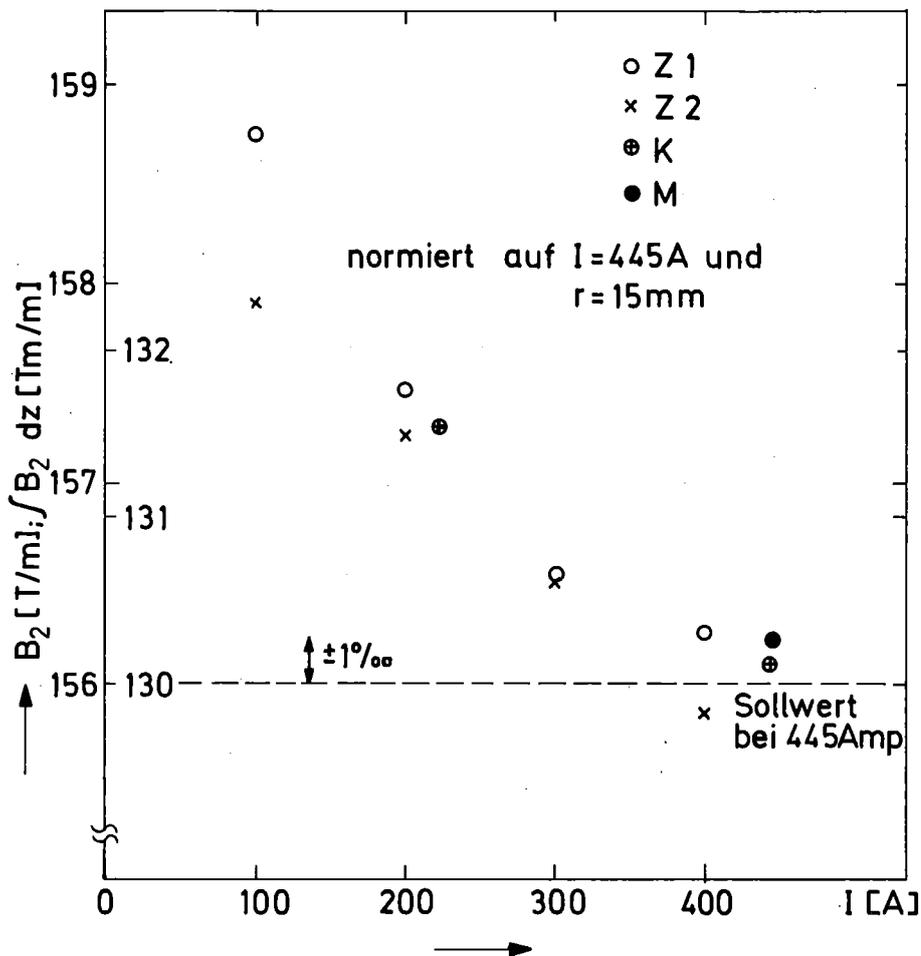


Abb. 8.8: Stromabhängigkeit von Gradient und Flußdichteintegral

9. Installation und Betriebserfahrungen

Abb. 9.1 zeigt in einer Skizze die prinzipielle Anordnung der Quadrupolmagnete und kryogener Versorgungseinrichtungen am Betriebsort. Die beiden Quadrupole sind durch einen normalleitenden Dipolmagneten von etwa 3 m Länge mit einem massiven Eisenjoch getrennt. Schwermetall-, Eisen- und Betonabschirmungen ge-

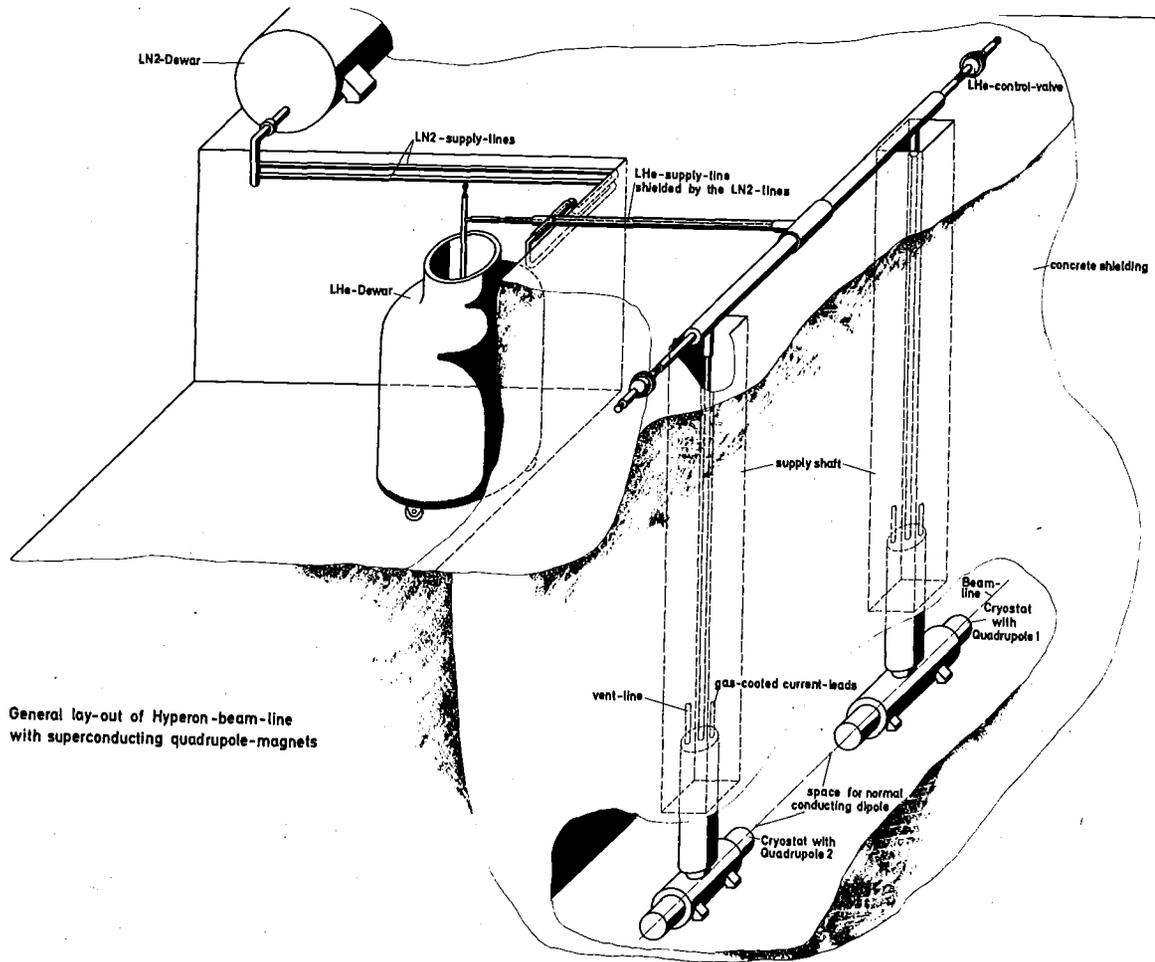


Abb. 9.1: Skizze der Installation zum Betrieb der Quadrupole in der CERN-Westhalle

gen Sekundärneutronen erstrecken sich etwa 6 m weit nach jeder Seite der Strahlachse und nach oben. Die Magnete sind nach Abschluß der Installation nur noch zugänglich, wenn Teile dieser Abschirmung entfernt werden. Alle Versorgungs- Abgas- und Kontrolleitungen mußten deshalb durch Schächte von $0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$

Querschnitt nach oben geführt und von dort in einen zugänglichen Bereich um das LHe-Dewar verlegt werden. Abb. 9.2 zeigt diesen Bereich. Im Vordergrund ist rechts das LN₂-Dewar, in der Mitte das

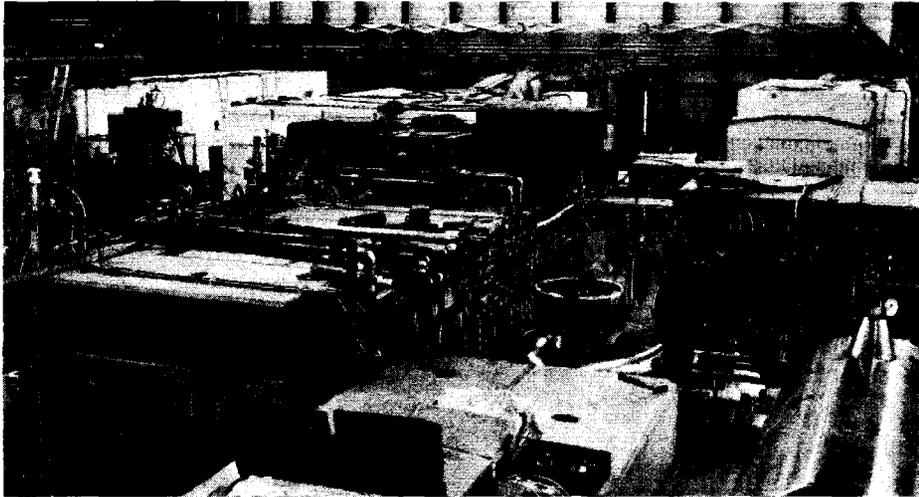


Abb. 9.2: Blick auf die installierte Anlage vor Fertigstellung der Betonabschirmung
(Foto: CERN)

LHe-Dewar erkennbar. Dahinter sind Meß- und Regelungsgeräte für kryogene Betriebsmittel und Vakuum angebracht. Am linken Bildrand ist das obere Ende des Versorgungsschachtes für den langen Quadrupol zu sehen. Die Magnete werden aus einem gemeinsamen 500-l-LHe-Dewar versorgt. Ein gefülltes Vorratsgefäß kann jederzeit bereitgehalten und innerhalb von 15 Minuten gegen das leere Dewar ausgetauscht werden. Ähnliches gilt für die LN₂-Versorgung. Dieses Auswechseln der Versorgungsgefäße ist an jedem Tag bzw. an jedem zweiten Tag erforderlich und stellt die einzige regelmäßige Wartungsaufgabe bei Dauerbetrieb dar, der dabei nicht unterbrochen zu werden braucht.

Bis auf die industriell vorgefertigten LHe- und LN₂-Versorgungsleitungen wurden alle Leitungen in CERN vor Ort gefertigt und verlegt. Damit konnte der zur Verfügung stehende Platz für die Installationen flexibel und optimal ausgenutzt werden. Abb. 9.3

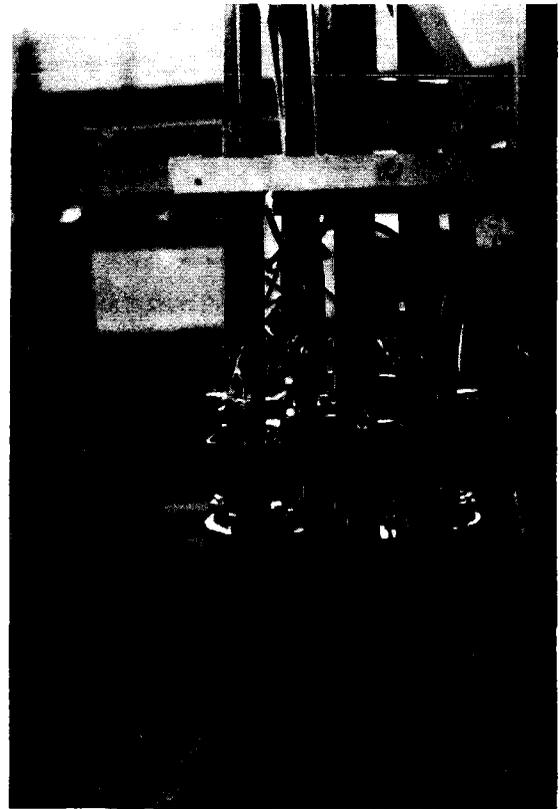
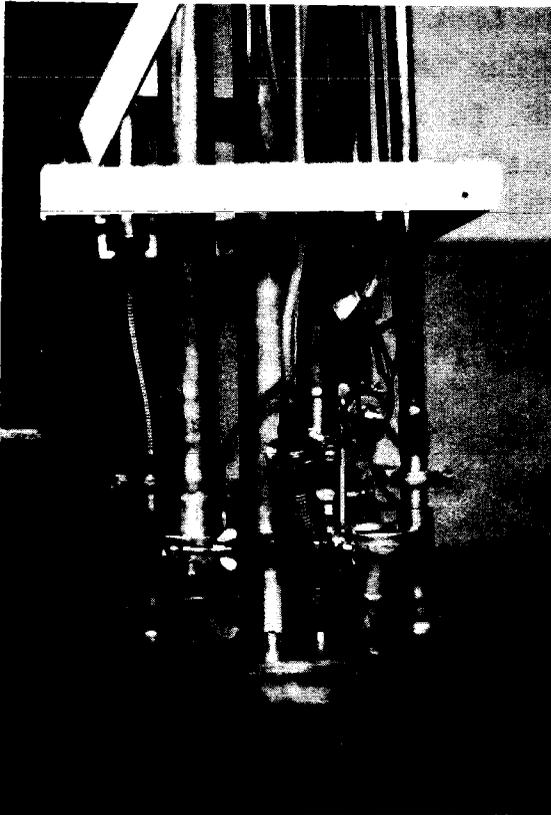


Abb. 9.3: Versorgungsleitungen am oberen Ende eines Kryostaten

zeigt in zwei Detailaufnahmen die Anschlüsse der Leitungen, die aus dem senkrechten Versorgungsschacht kommen, an einen Kryostaten.

Die von CERN geforderten Abnahmetests wurden ohne Schwierigkeiten durchgeführt. Die zum Abkühlen benötigte Menge an LHe entsprach den im KfK beobachteten Werten (ca. 2,6faches des theoretischen Minimums). Jeder Quadrupol konnte ohne Quench zwanzigmal bis zum Betriebsstrom erregt werden. Quenche, die durch Anfahren des kritischen Stromes hervorgerufen wurden, führten zu keiner unzulässigen Druckerhöhung im Helium-Abgas, das über elektrisch beheizte Wärmetauscher in ein zentrales Abgassystem geführt wird. Der geforderte maximale LHe-Verbrauch von 15 l/h für das Gesamtsystem wird nach einigen Stunden Betriebszeit deutlich unterschritten und erreicht etwa 9 bis 10 l LHe/h, so daß ein 500-l-Dewar erst nach 48 Stunden gewechselt zu werden braucht.

Das Überwachungs- und Regelsystem kann in der vorgesehenen Weise betrieben werden. Lediglich die Regelung des Helium-Abgasstromes durch die Stromzuführungen wurde nicht in Betrieb genommen (s. Kapitel 6), da der maximale Gasanfall gerade zur Kühlung der Stromzuführungen ausreicht.

Nach Fertigstellung der Anlage trat ein Leck mit einer Leckrate von etwa 5×10^{-4} bar m^3/sec zwischen dem LN_2 -Kühlschild und dem Isoliervakuum des kurzen Kryostaten auf. Es wird eine Undichtigkeit an einem Balg der LN_2 -Zuführungsleitung vermutet. Dieses Leck führt zu einem Betriebsdruck von ca. 10^{-5} mbar im kurzen gegenüber weniger als 10^{-7} mbar im langen Quadrupol. Der Druck steigt auch nach Langzeitbetrieb nicht an, da der austretende Stickstoff offenbar auf den kälteren Oberflächen des LHe-Tanks ausfriert.

Über Erwärmen hoch (ca. 2 bar) ist der Druck, mit dem das LN_2 -Versorgungsgefäß betrieben werden muß, um eine ausreichende Kühlung des Schildes im langen Quadrupol zu gewährleisten. Der Grund ist wahrscheinlich ein Stück der LN_2 -Versorgungsleitung zwischen LN_2 -Dewar und der vorgefertigten LHe/ LN_2 -Leitung, die vom LHe-Dewar abgeht. Dieses Stück ist nur schaumstoff-isoliert, so daß ein Teil des durchströmenden LN_2 verdampft. Das entstehende 2-Phasen-Gemisch erfährt an einigen engen Verteilungskanälen innerhalb des Kryostaten den beobachteten starken Druckabfall. Wegen des höheren Verbrauches muß das LN_2 -Dewar täglich statt halbwöchentlich gewechselt werden, doch ist der Dauerbetrieb sonst nicht gestört.

Seit seiner Inbetriebnahme im Dezember 1976 ist das System bis zum Herbst 1978 etwa 5000 Stunden lang betrieben worden. Außer dem regelmäßigen Auswechseln der Versorgungsdewars und eintägigen Abkühlphasen nach Experimentierpausen verlief der Betrieb vollautomatisch. Die vorhergesagten höheren Flüsse von Hyperonen mit Impulsen zwischen 75 und 150 GeV/c wurden beobachtet |13|, so daß ein genaueres Studium der Eigenschaften und Lebensdauern des Ω^- -Teilchens möglich wird |14|.

10. Anerkennung

Die supraleitenden Quadrupole wurden gemeinsam von zahlreichen Mitarbeitern des Instituts für Technische Physik aufgebaut und vermessen. Ihnen allen danke ich hiermit. Insbesondere möchte ich die Herren N. Brünner, S. Förster, G. Friesinger, H. Katheder, J. Reiner, H. Schmidt und P. Turowski erwähnen, in deren zum Teil unveröffentlichten internen Berichten ich wertvolles Material für diese Darstellung gefunden habe. Heinz Bayer, Albert Götz und Siegfried Stumpf danke ich besonders für ihre Einsatzbereitschaft während der Installationsphase in CERN, Frau Ansbach für das Schreiben des Manuskripts.

Literatur:

- |1| F. Arendt, N. Fessler-Wilhelmi, P. Komarek, P. Turowski:
"Supraleitende Magnete für die Forschung"; Kerntechnik
20 (1978), S. 267
- |2| M.A. Green et al.:
"The Magnet System for the Time Projection Chamber at
PEP", Proc. Appl. Supercon. Conf., Pittsburgh, PA,
25.09. - 28.09.1978, paper CA 12
- |3| H. Desportes:
"High Energy Physics Superconducting Magnet Program at
Saclay", Proc. 6th Int'l. Conf. Magn. Techn., Bratislava,
29.08. - 02.09.1977, S. 474 - 479
- |4| M. Marquet, M. Morpurgo:
"Construction and operation of two superconducting qua-
drupole lenses"; Cryogenics 11 (1971), S. 412
- |5| G. Petrucci:
"Beam for the SPS Hyperon Experiment",
1974 ; persönliche Mitteilung
- |6| F. Arendt et al.:
"Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochstrom-Supralei-
tung im Kernforschungszentrum Karlsruhe", KfK 2290, 1976
- |7| J.S. Colonias:
"Particle Accelerator Design: Computer Programs", New
York, London: Academic Press 1974, S. 74 - 90
- |8| H. Brechna, P. Turowski:
"Training and Degradation Phenomena in Superconducting
Magnets", Proc. 6th Int'l. Conf. Magn. Techn., Bratislava,
29.08. - 02.09.1977, S. 597
- |9| J.B. Jacobs:
"Liquid requirements for the cool-down of cryogenic equip-
ment", Adv. Cryog. Eng. 8 (1963), S. 529

- | 10 | H. Schmidt:
"Entwicklung eines Meßkonzepts und einer Meßapparatur für Präzisionsmessungen mit Induktionsspulen in inhomogenen Magnetfeldern", KfK und Univ. Karlsruhe, wird veröffentlicht

- | 11 | J. Brandes, G. Friesinger, A. Ulbricht:
"An Arrangement for Automatic Magnetic Field Measurements", KfK 1220, 1970

- | 12 | G. Friesinger, H. Schmidt:
"Mechanischer Aufbau einer Magnetfeldmeßapparatur mit rotierenden Langspulen", KfK-Ext. 3/77-1, 1977

- | 13 | WA-2-Collaboration:
"Particle Production at 200 GeV in the SPS Hyperon Beam", to be published in Nuclear Physics

- | 14 | "Hyperon Beams", CERN Courier 18 (1978), S. 257

Anhang A

Siegfried Förster:

Schrumpfvorgänge an Hyperonenquadrupolen

1. Festlegung des Schrumpfringparameters am Quadrupol für das Hyperonenstrahlexperiment beim CERN SPS

Für ein Hyperonenstrahlexperiment in CERN wurden 2 Quadrupole in Auftrag gegeben. Beide Quadrupole unterscheiden sich in der technischen Konzeption nur in der Länge. In diesem Bericht wird lediglich die Längere von beiden Versionen beschrieben. Die Hyperonenquadrupole konnten nicht aus einer Leiterlänge gewickelt werden.

Jeder Pol wurde einzeln im Naßwickelverfahren hergestellt, wobei der Supraleiter in einen Wicklungsträger aus V2A-Stahl eingebettet ist.

Die azimutale Anordnung der Wicklungsträger ist durch die Stützeile gegeben.

Nach dem Wickeln der Pole wurden diese auf ein zentrales Tragrohr montiert und durch 19 aufgeschrumpfte Armierungsringe aus einer hochfesten Al-Legierung auf diesen gehalten. Der Magnetverbund wird dann wiederum in einen zu Feldabschirmung notwendigen Zylinder aus weichmagnetischem Eisen eingeschrumpft. Das Gesamtschrumpfmaß beider Komponenten muß auch hier so festgelegt werden, daß bei Betriebstemperatur von 4,2 K noch Kraftschluß gegeben ist.

Für den Quadrupolverbund bestehend aus Supraleiter und Edelstahl wird hier ebenfalls:

- A. Die Kontraktion des Magnetverbundes und des Weicheisenzylinders bei 77 K gemessen und daraus das zum Schrumpfen notwendige Durchmessermaß der Armierungsringe im Außendurchmesser bestimmt.
- B. Die Kontraktion beider Körper errechnet und daraus wiederum das Durchmessermaß im Außendurchmesser der Armierung ermittelt.

Für die Bestimmung des Durchmessermaßes ist im folgenden:

DA293 = Außendurchmesser der Al-Armierung bei Raumtemperatur

DA77 = Außendurchmesser der Al-Armierung bei 77 K

Di293 = Innendurchmesser des Weicheisenzylinders bei Raumtemperatur

Di77 = Innendurchmesser des Weicheisenzylinders bei 77 K

DAM = Durchmesser der Al-Armierung zum Schrumpfen

Zu A:

Gemessen wird über dem Durchmesser der Al-Armierung bei 77 K:

$$DA_{293} = 128.08 \text{ mm}$$

$$DA_{77} = 127.67 \text{ mm}$$

$$\Delta d = 0.41 \text{ mm}$$

Gemessen wurde der Innendurchmesser des Weicheisenzylinders bei 77 K:

$$Di_{293} = 126.81 \text{ mm}$$

$$Di_{77} = 126.60 \text{ mm}$$

$$\Delta d = 0.21 \text{ mm}$$

Aus dem über dem Durchmesser der Al-Armierung gemessenen Δd wird die Dilatation des Magnetverbundes:

$$\begin{aligned} \frac{L_{293} - L_{77}}{L_{293}} &= \frac{\Delta d}{D_{A293}} \\ &= 320 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Bei 77 K wird zwischen dem Außendurchmesser des Magnetverbunds und dem Innendurchmesser des Weicheisenzylinders noch eine Gesamtschrumpfung von 0.05 mm angestrebt.

Somit ergibt sich:

$$DAM_{77} = Di_{77} + 0.05 \text{ mm}$$

$$= 126.65 \text{ mm}$$

Bestimmung des Durchmessermaßes über die Al-Armierung des Magneten:

$$DAM_{293} = \frac{DAM_{77}}{1 - \frac{L_{293} - L_{77}}{L_{77}}} \quad (1)$$

$$= 127.05 \text{ mm} = \text{Drehmaß}$$

Zu B:

Für die Bestimmung der Kontraktion wird die Dilatation über die prozentualen Flächenanteile der im Magnetverbund enthaltenen Werkstoffkomponenten ermittelt.

V2A:	Flächenanteil	49.39 cm ²	= 46.87 %
Kuprodukt:	"	26.21 cm ²	= 24.87 %
Al:	"	29.78 cm ²	= 28.26 %

Die Dilatation der Werkstoffe bei 77 K ist:

V2A	:	280 · 10 ⁻⁵
Kuprodukt	:	332 · 10 ⁻⁵
Al	:	420 · 10 ⁻⁵

Aus den prozentualen Flächenanteilen der Werkstoffe im Magnetverbund wird die mittlere Dilatation:

$$\frac{L_{293} - L_{77}}{L_{293} \text{ (Mittel)}} = 280 \cdot 10^{-5} \cdot \%V2A + 332 \cdot 10^{-5} \cdot \%kn + 420 \cdot 10^{-5} \cdot \%AL$$

$$\frac{L_{293} - L_{77}}{L_{293} \text{ (Mittel)}} = 332 \cdot 10^{-5}$$

Somit ergibt sich eine Kontraktion des Magnetverbundes bei 77 K:

$$\Delta d = \frac{L_{293} - L_{77}}{L_{293} \text{ (Mittel)}} \cdot DA_{293}$$

$$\Delta d = - 0.425 \text{ mm}$$

Die Kontraktion des Weicheisenzylinders im Innendurchmesser bei 77 K ist:

$$\begin{aligned} \Delta d &= \frac{L_{293} - L_{77}}{L_{293} \text{ (Fe)}} \cdot Di_{293} \\ &= 176 \cdot 10^{-5} \cdot 126.81 \\ &= - 0.22 \text{ mm} \end{aligned}$$

Bei 77 K wird zwischen dem Außendurchmesser des Magnetverbundes und dem Innendurchmesser des Weicheisenzylinders noch eine Gesamtschrumpfung von 0.05 mm angestrebt.

Somit ergibt sich:

$$\begin{aligned} \text{DAM77} &= \text{Di77} + 0.05 \text{ mm} \\ &= 126.59 + 0.05 \\ &= 126.64 \text{ mm} \end{aligned}$$

Bestimmung des Drehmaßes über die Al-Armierung des Magneten:

$$\begin{aligned} \text{DAM293} &= \frac{\text{DAM77}}{1 - \frac{L_{293} - L_{77}}{L_{293} \text{ (Mittel)}}} \\ &= 127.06 \text{ mm} = \text{Drehmaß} \end{aligned}$$

In der folgenden Tabelle sind die gemessenen und errechneten Daten gegenübergestellt.

	gemessen	errechnet
<u>1. Magnetverbund</u>		
Δd	- 0.41 mm	- 0.425 mm
Dilatation	$320 \cdot 10^{-5}$	$332 \cdot 10^{-5}$
<u>2. Weicheisen- zylinder</u>		
Δd	- 0.21 mm	- 0.22 mm
Drehmaß zum Schrumpfen	127.05 mm	127.06 mm

Im folgenden wird überprüft, ob auch bei 4,2 K noch Kraftschluß zwischen dem Innen- und Außenkörper vorhanden ist.

Die Dilatation der Werkstoffe bei 4.2 K ist:

$$\begin{aligned} V2A &= 296 \cdot 10^{-5} \\ \text{Kuprodur} &= 366 \cdot 10^{-5} \\ Al &= 450 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich ein

$$\frac{L_{293} - L_{4.2}}{L_{293} \text{ (Mittel)}} = 357 \cdot 10^{-5}$$

Das vorher festgelegte Drehmaß

DAM293 = 127.06 mm wird bei 4,2 K:

$$\begin{aligned} \text{DAM}_{4,2} &= \text{DAM}_{293} \left(1 - \frac{L_{293} - L_{4.2}}{L_{293} \text{ (Mittel)}} \right) \\ &= 126.61 \text{ mm} \end{aligned}$$

Der Innendurchmesser des Weicheisenzylinders schrumpft bei 4.2 K auf einen Durchmesser von:

$$\begin{aligned} \text{Di}_{4.2} &= \text{Di}_{293} \left(1 - \frac{L_{293} - L_{4.2}}{L_{293} \text{ (Fe)}} \right) \\ &= 126.57 \text{ mm} \end{aligned}$$

Das heißt auch bei Betriebstemperatur von 4,2 K ist zwischen Magnet und Weicheisenzylinder noch ein Kraftschluß vorhanden.

2. Schrumpfvorrichtung und Schrumpfvorgang am Quadrupol für das Hyperonenstrahlexperiment

Der Hyperonenquadrupol muß longitudinal und azimuthal im Weicheisenzylinder fixiert werden.

Für das während des Schrumpfens notwendige Spiel zwischen Magnet-
außendurchmesser und Innendurchmesser des Weicheisenzylinders
wurde der Magnet auf 77 K unterkühlt.

Der Weicheisenzylinder blieb bei Raumtemperatur. Für die longi-
tudinale Positionierung des Magneten im Eisen wurde die Kon-
traktion durch den Einstellring ausgeglichen.

In Abb. A1 sind die Durchmesser-Verhältnisse zwischen Innen- und
Außenkörper vor, während und nach dem Einschrumpfen zu erkennen.

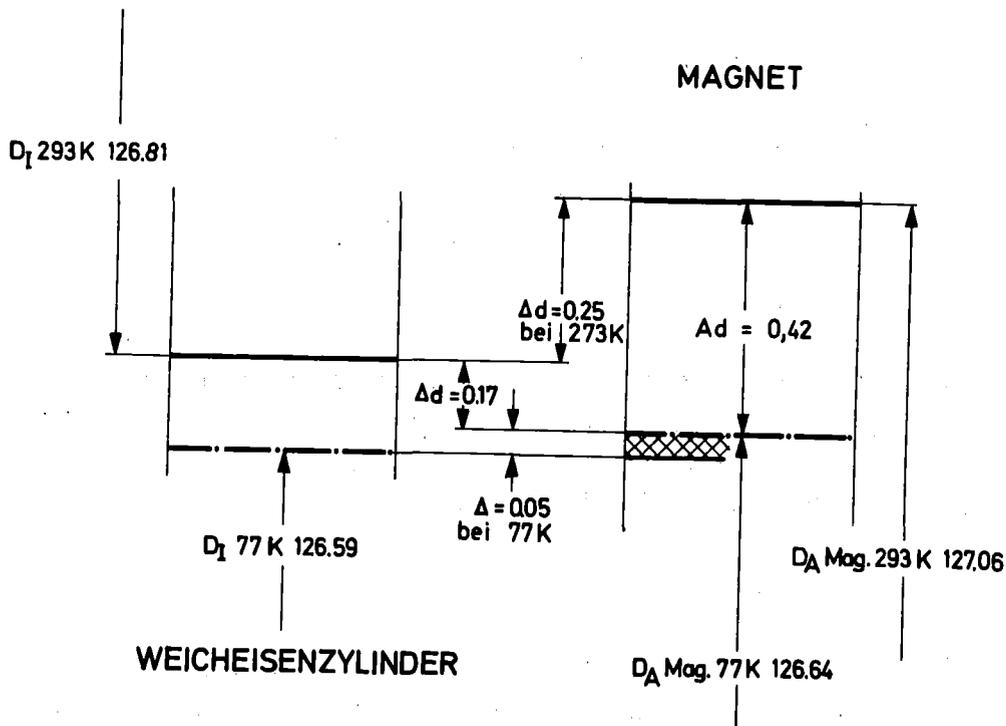


Abb. A1: Durchmesser-Verhältnisse zwischen Innen- und Außenkörper.

3. Spannungen im Magnetverbund und Weicheisenzyylinder am
Quadrupol für das Hyperonenstrahlexperiment

Die max. Pressung wird

$$\epsilon = p \left(\frac{1}{E_1} \frac{0.7r_{a1}^2 + 1.3r_{i1}^2}{r_{a1}^2 - r_{i1}^2} + \frac{1}{E_2} \frac{1.3r_{a2}^2 + 0.7r_{i2}^2}{r_{a2}^2 - r_{i2}^2} \right)$$

Dabei ist:

p = die radiale Pressung

ϵ = die Gesamtschrumpfung beider Sitzflächen bei 293 K

E_1, E_2 = die Elastizitätsmodule des Innen, bzw. des Außenkörpers

In Abb. A2 ist die Bedeutung der Radien r_{i1} , r_{a1} , r_{a2} , r_{i2} zu erkennen.

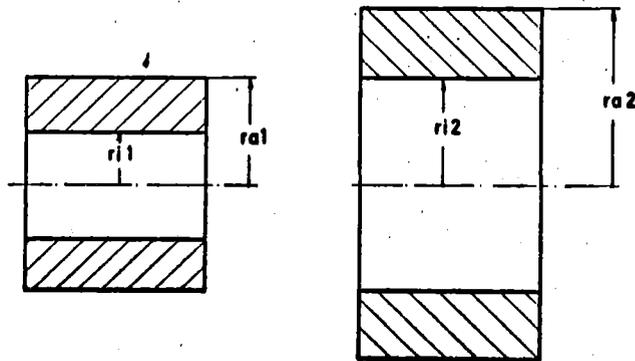


Abb. A2 : Bedeutung der Radien

Für den Quadrupol ist:

$$\begin{aligned}r_{i1} &= 18 \text{ mm} \\r_{a1} &= 63.5 \text{ mm} \\r_{i2} &= 63.5 \text{ mm} \\r_{a2} &= 98 \text{ mm} \\E_2 &= 2.1 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2\end{aligned}$$

E_1 wird nach dem früher erwähnten Verfahren ermittelt.

Die Elastizitätsmodule der verwendeten Werkstoffe sind:

$$\begin{aligned}\text{für V2A: } E_{FE} &= 2.1 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2 \\ \text{für den Supraleiter: } E_{kn} &= 1.43 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2 \\ \text{für Aluminium: } E_{AL} &= 7.21 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2\end{aligned}$$

Daraus ergibt sich ein mittlerer Elastizitätsmodul

$$\begin{aligned}E_1 &= 1.55 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2 \\ \epsilon &= \frac{\rho_1 + \rho_2}{r_{i2}} = \frac{0.125}{63.5} = \frac{1}{508}\end{aligned}$$

Nach Einsetzen der Zahlenwerte erhält man eine radiale Pressung von

$$p = 10.5 \text{ kp/mm}^2$$

Die resultierende Ringspannung im Außenring errechnet sich

$$\sigma_{res} = p \frac{\sqrt{3} r_{a2}^4 + r_{i2}^4}{r_{a2}^2 - r_{i2}^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{res} = 32 \text{ kp/mm}^2$$

Für den Innenring ist

$$\sigma_{res} = p \frac{\sqrt{3} \cdot r_{a1}^4 + r_{i1}^4}{r_{a1}^2 - r_{i1}^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{res} = 19.8 \text{ kp/mm}^2$$

Die Ergebnisse der berechneten Ringspannungen sind unter dem Aspekt zu betrachten, daß ein Magnet ein komplexes Gebilde darstellt und nicht einen starren Körper. Die Rechnung erfolgte jedoch unter der letzteren Voraussetzung, d.h. bei der Bestimmung der resultierenden Ringspannung wurde ein starrer Körper angenommen. Das bedeutet, daß die berechneten Spannungen über den Werten liegen, welche real in den Magneten und Eisen auftreten.

4. Fazit

Eine Armierung von Magneten durch Aufschrumpfen von Al-Ringen ist technisch kein Problem.

Das Einschrumpfen der Magnete in das zur Abschirmung notwendige Eisen ist technisch bedingt nur bis zu einer bestimmten Länge möglich.

Die Betrachtung der Spannungen zeigt jedoch, daß im warmen Zustand ($T = 293 \text{ K}$) im Magneten und im Abschirmeisen sehr hohe Spannungen auftreten, die bis zum plastischen Bereich führen können.

Das bedeutet, daß der Anwendung der Schrumpftechnik zwischen Magnet und Eisen ab einem gewissen Durchmesserbereich Grenzen gesetzt sind. Die Vorteile der Schrumpftechnik liegen im Gegensatz zum geteilten Eisen, welches verschraubt werden muß, in kleiner Bauweise.