

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

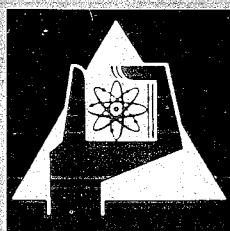
November 1968

KFK 891

Institut für Experimentelle Kernphysik

Ein Spindrehmagnet für hochenergetische Neutronen
und geladene Teilchen

H. Brückmann, E. L. Haase, W. Kluge, L. Schänzler



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

November 1968

KFK 891

Institut für Experimentelle Kernphysik

Ein Spindrehmagnet für hochenergetische Neutronen
und geladene Teilchen

H. Brückmann, E.L. Haase, W. Kluge und L. Schänzler

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe

Abstract:

The method of spin rotation by means of a spin precession magnet has the advantage to eliminate instrumental asymmetries in polarization experiments. For such experiments at the Karlsruhe isochronous cyclotron a spin precession magnet was constructed, which is able to turn the spin of neutrons through 90° in either direction for energies of up to 70 MeV. The magnet is a solenoid with a length of 2,48 m and with a maximum rating of $(8.09 \pm 0.09) \cdot 10^5$ ampere turns. The solenoid is now in use for neutron polarization measurements, but it was found in experiments, that this magnet is also suitable for spin precession of charged particles.

1. Einleitung

Bei Polarisationsmessungen führt eine nicht exakte Symmetrie der experimentellen Anordnung zu Fehlerquellen, deren Einfluß stets mit großer Sorgfalt untersucht werden muß. Solche Fehler können auf elegante Art durch Drehung der Spinrichtung der Teilchen um $\pm 90^\circ$ mit einem Spindrehmagneten vermieden werden. Die Methode der Spindrehung im Magnetfeld wurde zuerst von Hillman et al. [1] im Jahre 1956 bei Polarisationsmessungen an 100 MeV-Neutronen angewandt.

Die Methode läßt sich auch für geladene Teilchen anwenden. Allerdings ist dann die Ablenkung der Teilchen im Magnetfeld zu berücksichtigen und an den Magnetfeldverlauf sind dann besondere Anforderungen zu stellen. Für hochenergetische geladene Teilchen wurde ein Spindrehmagnet bisher nur in sehr wenigen Laboratorien [2] eingesetzt.

Die Wirkungsweise eines Spindrehmagneten (Solenoid) ist folgende: Der mit einem magnetischen Moment verbundene Spin der Teilchen wird durch ein Magnetfeld in Flugrichtung zu einer Präzessionsbewegung um die Achse des Magnetfeldes veranlasst, und zwar mit einer Frequenz

$$\nu_p = \frac{g \cdot \mu_k \cdot H}{h}$$

In dieser Gleichung bedeutet H die magnetische Feldstärke, μ_k das Kernmagneton, g das gyromagnetische Verhältnis und h das Plancksche Wirkungsquantum. Mit einem Magnetfeld geeigneter Stärke und Länge kann also der Spin um 90° nach rechts oder links gedreht werden. Das bedeutet, daß die Polarisationsrichtung durch Umpolung der Stromrichtung im Magneten umgeschaltet werden kann. Bei einem homogenen Feld ergibt sich für eine Spindrehung um $\pm 90^\circ$ die erforderliche Amperewindungszahl $H \cdot l$ aus der Gleichung

$$H \cdot l = \frac{v \cdot h}{4 \cdot g \cdot \mu_k (1 - \beta^2)^{1/2}}$$

(l Länge des Magnetfeldes, v Geschwindigkeit der Neutronen, $\beta = v/c$)
Im Falle eines inhomogenen Feldes ist $H \cdot l$ durch $\int \vec{H} \cdot d\vec{l}$ zu ersetzen.

Da am Karlsruher Isochron-Zyklotron Neutronen-Polarisationsexperimente im Energiebereich zwischen 10 und 60 MeV durchgeführt werden sollten, wurde ein Spindrehmagnet gebaut, der in der Lage ist, den Spin von 70 MeV-Neutronen um $\pm 90^\circ$ zu drehen. Angestrebt wurde beim Bau unseres Magneten eine hohe Homogenität des Magnetfeldes und möglichst schwache Randfelder. Eine hohe Magnetfeldhomogenität und schwache Randfelder verhindern eine Depolarisation der Neutronen beim Durchlaufen des Magneten und ermöglichen es auch, den Spindrehmagneten für geladene Teilchen zu verwenden. Schwache Randfelder haben außerdem den Vorteil, daß magnetische Beeinflussungen der Detektoren und des Primärstrahles klein und damit unbedeutend sind. Außerdem sollte der Magnet trotz seines hohen Gewichtes leicht und präzise zu justieren sein.

Der bei unserem Magneten erreichte Wert für $\int \vec{H} \cdot d\vec{l}$ beträgt $(8.09 \pm 0.09) \cdot 10^5 \text{ AW}$ (siehe Abschnitt 3). Damit stellt dieser Magnet den zweitgrößten Spindrehmagneten dar, der bisher bei Polarisationsexperimenten benutzt wurde. Eine Zusammenstellung der existierenden Neutronenspindrehmagneten zeigt folgende Tabelle:

Standort	$\int \vec{H} \cdot d\vec{l}$ [AW]	E_n [MeV]	Typ	Autoren
Harwell	1.14×10^6	136	Solenoid	Hillman et al. [1]
Karlsruhe	8.09×10^5	70	Solenoid	diese Arbeit.
Univ. Calif. Livermore	6.55×10^5	46	Solenoid	Wong et al. [3]
Univ. Wisconsin Madison	3.15×10^5	11	Solenoid	Dubbeldam and Walter [4]
Duke Univ. Durham	ca 3×10^5	ca 10	Solenoid	Sawers et al. [5]
Amsterdam	2×10^5	4	Solenoid	Dubbeldam et al. [6]
Notre Dame Univ. Indiana	----	6	Polschuhmagnet	Lietz et al. [7]
Harwell	----	1	Polschuhmagnet	Ferguson and White [8]

E_n gibt jeweils die Energie der Neutronen an, bis zu der noch eine Spindrehung um $\pm 90^\circ$ erfolgen kann. Die beiden letzten Magneten in der Tabelle sind als Polschuhmagnete ausgeführt. Bei diesen Magneten steht das Feld senkrecht zur Flugrichtung und zur Polarisationsrichtung. Die Spindrehung erfolgt um 180° .

Die Eigenschaften und der Aufbau unseres Magneten werden zusammen mit den erzielten Messergebnissen in den folgenden Abschnitten im einzelnen besprochen.

2. Technische Ausführung des Spindrehmagneten

Der Aufbau des Spindrehmagneten ist aus Abb. 1 ersichtlich. Im wesentlichen besteht der Magnet aus 2 hintereinander angeordneten Spulen und einem Eisenmantel. Jede der beiden Spulen hat 8 Lagen mit jeweils 116 Windungen, die auf ein Aluminiumrohr aufgebracht sind. Das für die Wicklungen verwendete Hohlleiter-Kupfer-Profil hat ein Außenmaß von 9×9 mm und eine innere Öffnung von 4×4 mm für die Wasserkühlung. Die einzelnen Lagen der Spule sind gegeneinander mit Baumwolle isoliert. Zur Verbesserung der Isolationswerte und zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit wurden die ganzen Spulen bei der Fertigung in Epoxydharz eingebettet. Je 2 benachbarte Lagen haben einen gemeinsamen Wasseranschluß, so daß das Wasser in allen Lagen bezüglich der Symmetrieachse in gleicher Richtung fließt. Mechanische Spannungen, hervorgerufen durch Temperaturunterschiede, werden dadurch auf ein Mindestmaß reduziert.

(In Abb. 1 ist nur je 1 Wasseranschluß gezeichnet.) Bei einem Druck von 7 at fließen durch die beiden Spulen zusammen $1,5 \text{ m}^3$ Kühlwasser pro Stunde, die bei voller Last (400 A) eine Leistung von 45 kW wegkühlen. Zur Sicherung gegen Überhitzung der Spulen sind an den Wasserabflußstutzen Thermorelais mit einem Schalterpunkt bei 80°C angebracht. Außerdem kontrolliert ein Durchflußwächter die gesamte durchfließende Wassermenge. Im Gegensatz zur Wasserversorgung sind die zwei Spulen elektrisch in Serie geschaltet. Der Magnetstrom, der auf besser als 0,5% des jeweils eingestellten Wertes stabilisiert ist, wird von einem Motorgeneratorsatz geliefert. Die Stromrichtung kann auch bei Vollast durch Schalterbetätigung oder automatisch innerhalb von 2 Sekunden umgepolt werden. Der fertig montierte Magnet ruht auf einem 3-beinigen Eisengestell (siehe Abb. 2), das in der

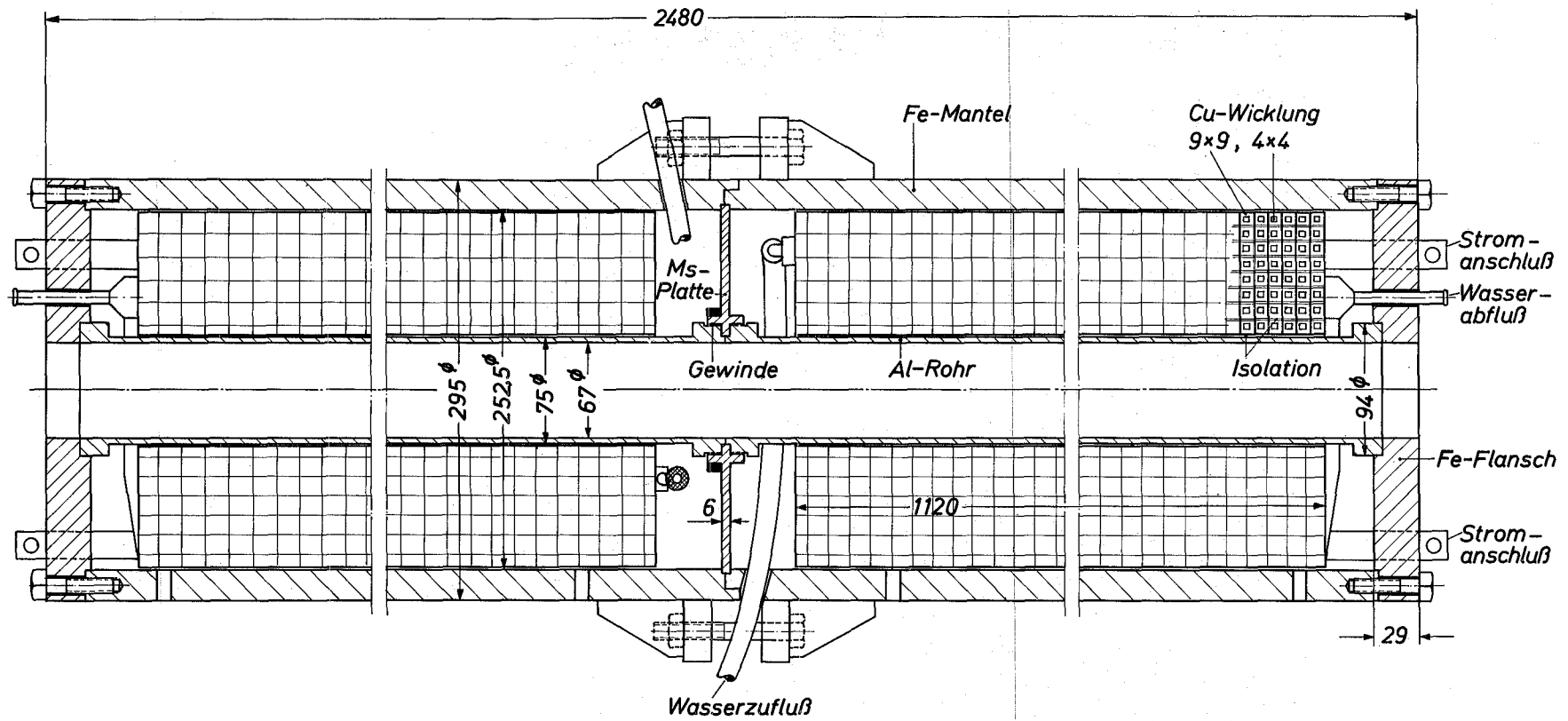


Abb. 1 Aufbau des Spindrehmagneten

Höhe justierbar und um eines seiner 3 Beine drehbar ist, Zusammen mit dem Eisengestell wiegt der Magnet etwa eine Tonne. Die Spulen, der Motorgeneratorsatz und die Einheiten für die Stromstabilisierung wurden von der Firma BBC in Mannheim geliefert.

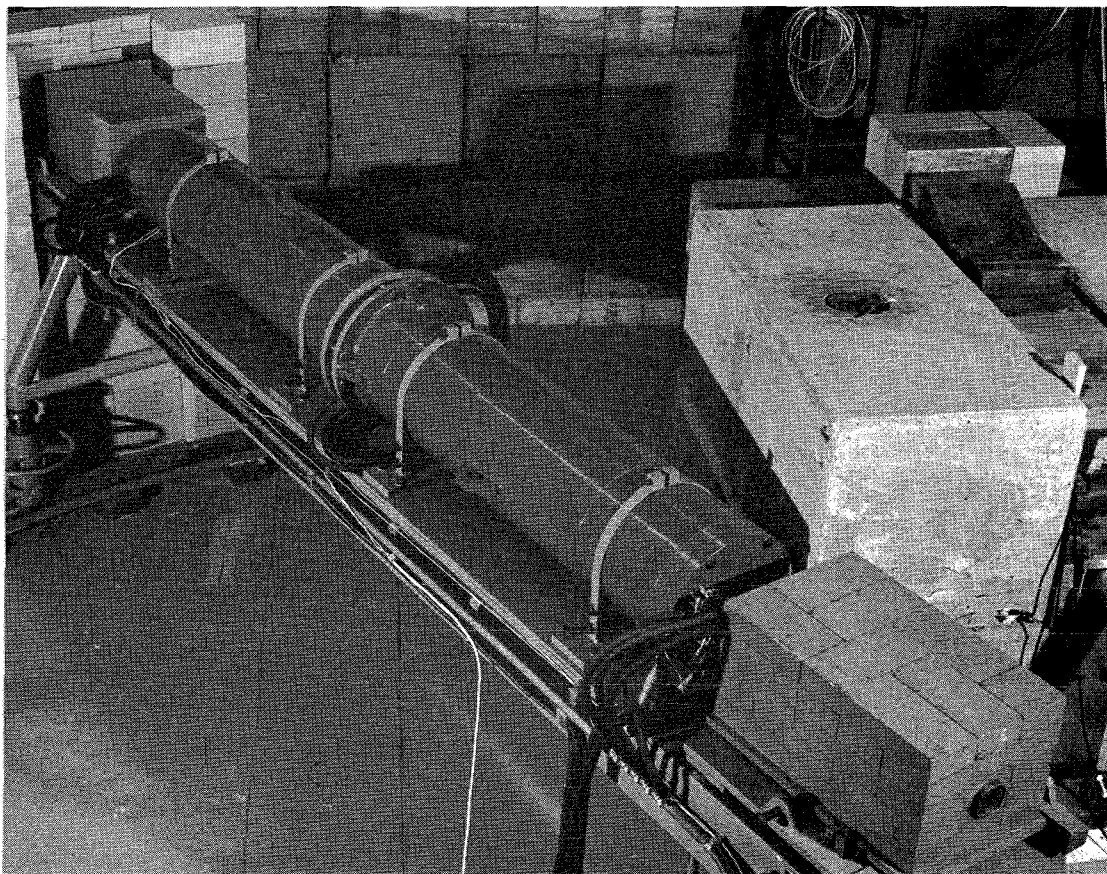


Abb. 2

Der Spindrehmagnet und seine Aufstellung in der Experimentierhalle.

3. Feldverlauf

Den in der Achse des Magneten gemessenen Feldverlauf zeigt Abb. 3. Der starke Abfall des Feldes in der Mitte des Magneten erklärt sich aus der Verwendung von zwei hintereinander angeordneten Spulen, die in der Mitte nicht unmittelbar aneinander anstoßen, da in der Mitte Platz für den Anschluß der Wasserkühlung notwendig ist. In den anderen Bereichen ist das Feld sehr gut homogen und fällt an den Enden rasch ab. In 10 cm Abstand vom Magnetende hat das Feld nur noch die doppelte

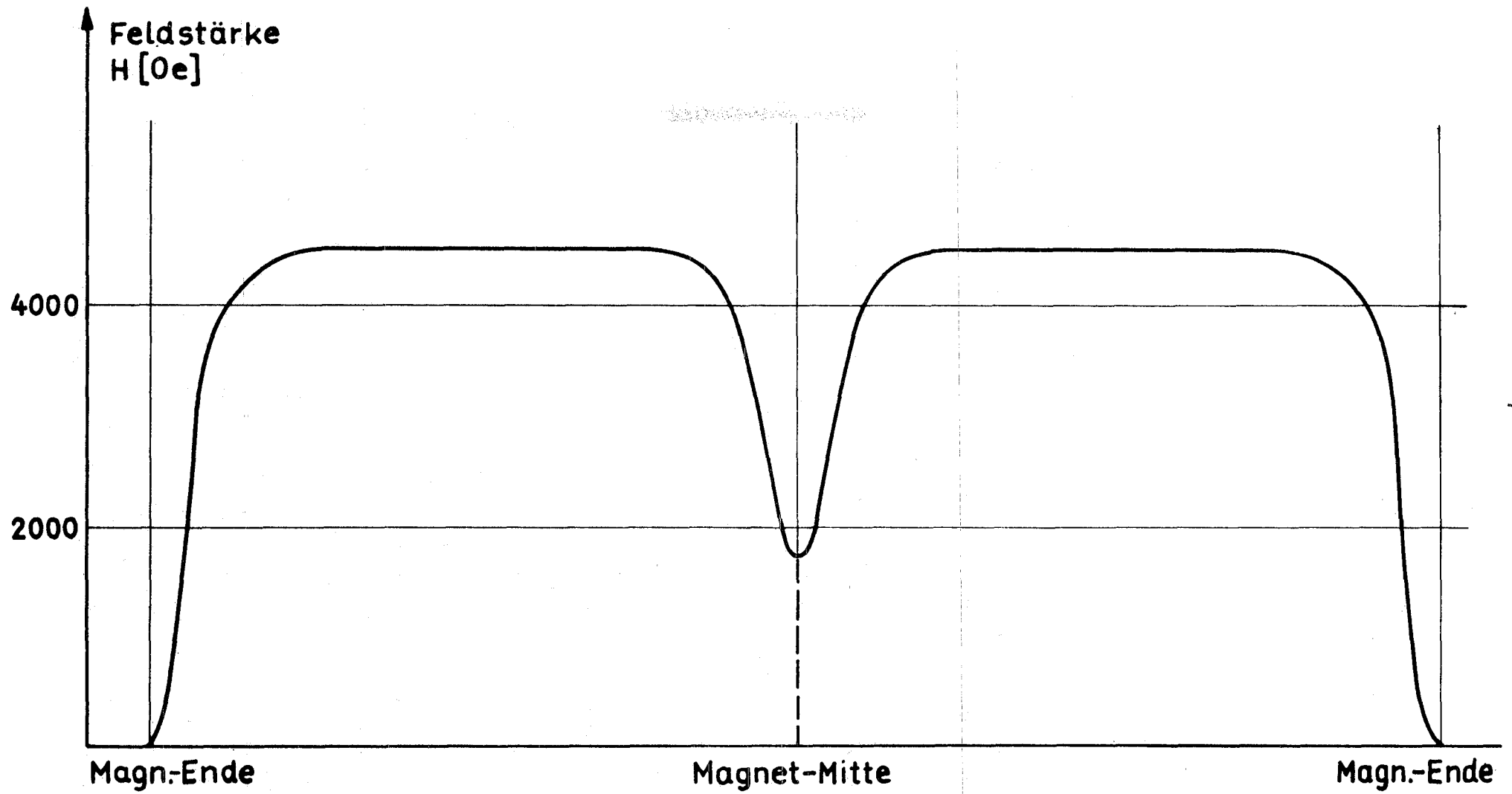


Abb. 3 Magnetische Feldstärke in der Achse des Spindrehmagneten bei einer Stromstärke von 400 A

Stärke des Erdfeldes. Nachweisdetektoren (Szintillationszähler) waren bei unseren ersten Polarisationsexperimenten [9] in 3,30 m Abstand vom Magneten aufgestellt. Ein Einfluß der Streufelder auf die Detektoren war infolgedessen ausgeschlossen.

Aus der Messung des Feldverlaufs (Abb.3) wurde der Wert für $\int \vec{H} \cdot d\vec{l}$ zu $(8.09 \pm 0.09) \cdot 10^5$ AW ermittelt. Wie sich aus Messungen des radialen Feldverlaufs ergab, ist für eine Neutronenbahn parallel zur Spulenchse in einem Abstand von 3 cm $\int \vec{H} \cdot d\vec{l}$ nur um wenige % von dem Wert auf der Achse verschieden. Dies bedingt zusammen mit dem raschen Feldabfall an den Enden, daß keine Depolarisationseffekte auftreten (siehe Abschnitt 5). Im Abschnitt 4 wird außerdem noch gezeigt, daß der Magnet infolge seiner Feldeigenschaften nicht nur zur Spindrehung von Neutronen, sondern auch von geladenen Teilchen geeignet ist.

4. Die Eigenschaften des Spindrehmagneten für geladene Teilchen

Grundsätzlich ist ein Spindrehmagnet natürlich nicht nur für Neutronen sondern auch für geladene Teilchen zur Spindrehung verwendbar. Im Gegensatz zu Neutronen tritt bei geladenen Teilchen noch die Lorentzkraft auf und beeinflusst die Bahn der Teilchen, wenn Magnetfeldkomponenten senkrecht zur Flugrichtung vorhanden sind. Bei gekrümmten Teilchenbahnen können daher durch das Umschalten des Magneten Asymmetrien vorgetäuscht werden. Die Frage, ob ein Spindrehmagnet für geladene Teilchen geeignet ist, kann nur bei sehr genauer Kenntnis der ionenoptischen Eigenschaften des Magneten beantwortet werden. Zur Ermittlung dieser Eigenschaften führten wir folgendes Experiment durch: Der nahezu parallele Deuteronenstrahl (51,5 MeV) vom Zyklotron wurde direkt durch die Achse des Magneten geschossen. Am Eingang des Magneten befand sich eine spezielle Lochblende und am Ausgang eine photographische Platte, auf der das Bild der Lochblende ohne und mit Magnetstrom aufgenommen wurde. Das Ergebnis einer solchen Aufnahme zeigt Abb. 4. In der linken Bildhälfte ist das Bild der Lochblende ohne Magnetstrom und in der rechten Hälfte mit Magnetstrom (270 A) zu sehen. Es tritt bei eingeschaltetem Strom eine leichte Drehung des Bildes um $13,4^\circ$ und eine sehr schwache Verkleinerung von 3% ein. Beide Effekte können erklärt werden, und zwar einerseits dadurch, daß in einem homogenen Feld Teilchen, die unter

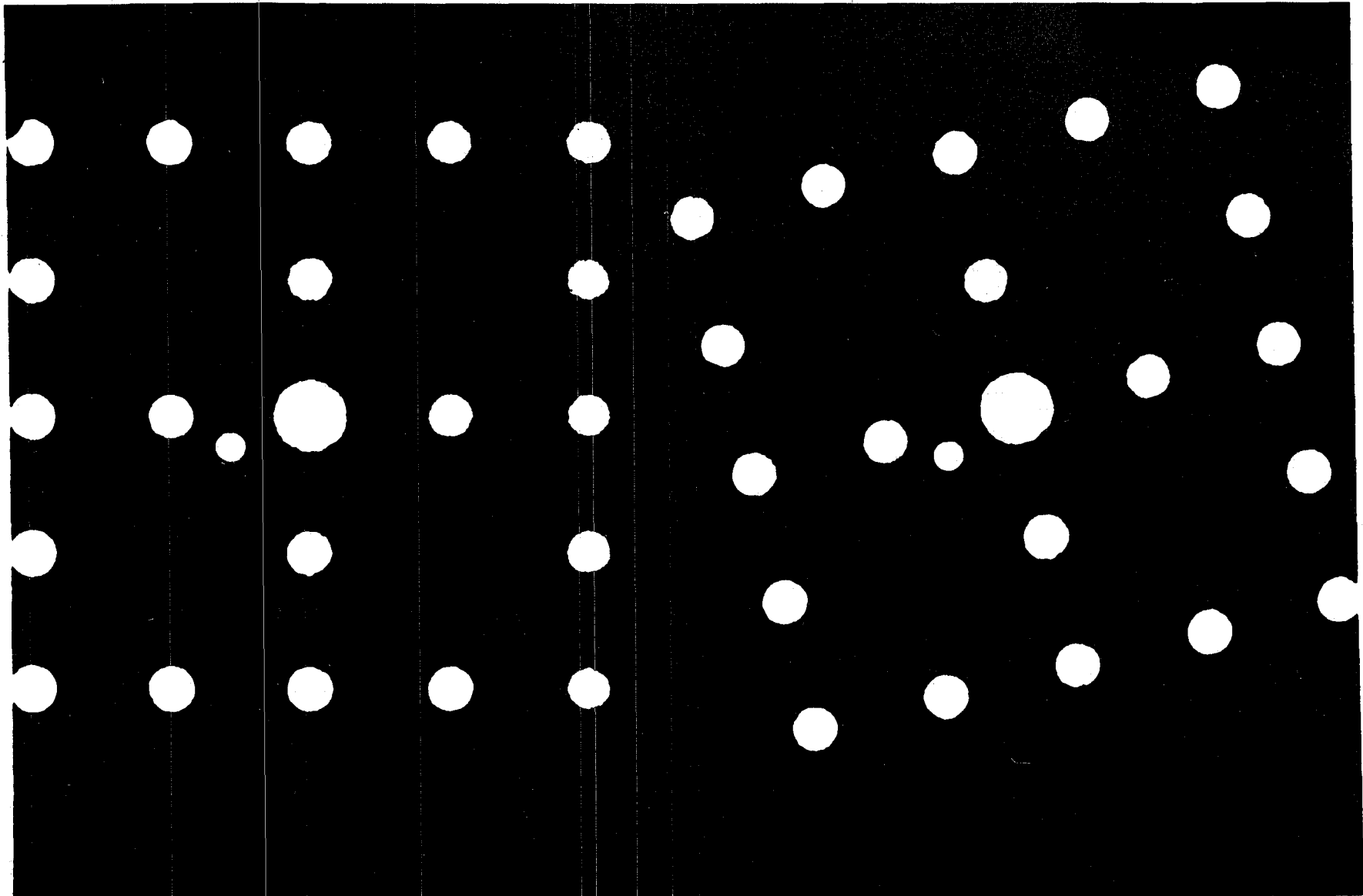


Abb. 4 Test der Brauchbarkeit des Spindrehmagneten für geladene Teilchen. Das von Deuteronen erzeugte Bild der speziellen Lochblende, links ohne Strom und rechts mit Strom (270 A) im Spindrehmagneten.

einem Winkel zur Feldrichtung einfallen, eine spiralförmige Bahn beschreiben, und andererseits dadurch, daß die Randfelder und das inhomogene Feld in der Magnetmitte eine fokussierende Wirkung haben. Diese Fokussierungseigenschaften konnten auch aus dem gemessenen Feldverlauf (siehe Abb. 3) berechnet werden, und zwar in Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

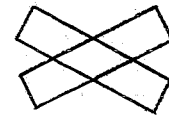
Das wichtigste Ergebnis des Experimentes ist jedoch, daß Bildverzerrungen nicht beobachtet wurden.

Die Abbildung ist innerhalb von 2% der bilderzeugenden Lochblende ähnlich.

Wie die nebenstehenden beiden Skizzen zeigen, können daher bei Verwendung einer festen Blende hinter dem Magneten keine falschen Asymmetrien auftreten. Denn das Profil des Strahles, der die Blende am Ende des Magneten passiert, hat vor dem Magneten für beide Stromrichtungen die gleiche Form. Das Profil unterscheidet sich nur in der Lage, da ein Umpolen des Magnetfeldes nur eine Drehung bewirkt. Die schwache Verkleinerung von 3% tritt für beide Stromrichtungen auf, weil die Brennweiten von magnetischen Linsen nur vom Quadrat der Feldstärke abhängen. Wenn also die Intensität vor dem Magneten nicht vom Azimuthalwinkel ϕ abhängt, dann ist dieser Spindrehmagnet auch für geladene Teilchen gut geeignet. Diese Azimuthalwinkelunabhängigkeit tritt aber bei allen Doppelstreueversuchen mit unpolarisiertem Primärstrahl auf.



Profil der Blende und des ausgeblendeten Strahles am Ende des Magneten



Profil und Lage des die Blende passierenden Strahles vor dem Magneten für die beiden Stromrichtungen

5. Depolarisation im Spindrehmagneten

Aus Gründen der Paritätserhaltung tritt bei Kernreaktionen mit unpolarisiertem Target und unpolarisierten Geschossteilchen immer nur eine transversale Polarisation auf. Durch die Inhomogenitäten des Magnetfeldes an den Enden und in der Mitte des Spindrehmagneten treten an diesen Stellen Feldkomponenten senkrecht zur Flugrichtung der Neutronen auf, die die transversale Polarisation in eine longitudinale Polarisation umwandeln können. Da aber die Mott-Schwinger-Streuung, die in unseren ersten Experimenten zur

Polarisationsanalyse verwandt wurde, nur ein Analysator für transversale Polarisation ist, kommt eine Änderung der transversalen Polarisation einer Depolarisation gleich.

Atkinson und Sherwood [10] haben die Depolarisation von Neutronen in einem Spindrehmagneten unter folgenden Voraussetzungen berechnet.

- 1) der Magnet ist ein Solenoid und besteht aus einer einzigen Lage mit vielen Windungen.
- 2) Die Polarisation ist anfänglich transversal.
- 3) Die Neutronen fliegen parallel zur Achse des Solenoiden.
- 4) Der Spin wird beim Durchlaufen des Magneten um 180° gedreht.

Für ein Verhältnis $L/a = 10$ (L Länge des Magneten, a Radius der inneren Öffnung) erhalten Atkinson und Sherwood eine Depolarisation von 1%.

Für größere Verhältnisse von L/a wird die Depolarisation kleiner.

Unser Magnet hat nicht nur eine Lage, sondern acht Lagen und besitzt ein Verhältnis L/a von 75. Außerdem ist er von einem Eisenmantel umgeben. Alle diese Faktoren erhöhen die Homogenität des Magnetfeldes und verringern folglich die Depolarisation. Günstig wirkt sich auch noch aus, daß in unserem Falle statt einer Spindrehung um 180° nur eine Drehung um $\pm 90^\circ$ vorgenommen wird. Allerdings fliegen wegen der punktförmigen Neutronenquelle die Neutronen im allgemeinen nicht parallel zur Solenoidachse durch den Magneten. Der größte auftretende Winkel zwischen Flugrichtung und Achse ist aber nur $0,7^\circ$. Die Feldkomponente senkrecht zur Flugrichtung beträgt damit $H_\perp = 0,012 H_\parallel$. Der Spin wird dadurch maximal um etwa 1° aus der Ebene senkrecht zur Flugrichtung herausgedreht. Die Polarisation ändert sich dadurch fast nicht, da der Kosinus von $1^\circ = 0,9998$ ist. Die starke Inhomogenität in der Mitte des Magneten verursacht praktisch keine Depolarisation, da die Radialkomponente des Feldes am Ende der ersten Spule nach außen und am Anfang der zweiten Spule nach innen, oder jeweils umgekehrt, gerichtet ist.

Eine nach innen gerichtete Radialkomponente kippt den Spin nach vorne, während eine nach außen gerichtete Komponente ihn nach rückwärts dreht. Die durch die Radialfelder bewirkten beiden Drehungen heben sich gegenseitig auf, da der Spin sich auf der Strecke zwischen den beiden Spulen nur wenig in der Ebene senkrecht zur Flugrichtung gedreht hat.

Die Depolarisation im Magneten ist nach dieser Abschätzung sehr klein und sollte auf jeden Fall unter 1% liegen.

6. Anwendung des Spindrehmagneten bei Polarisationsexperimenten

Der beschriebene Magnet wurde in einem ersten Experiment (9) für die Messung der Neutronenpolarisation bei der Reaktion $C^{12}(d,n_0)N^{13}$ verwendet. Dabei wurde angestrebt, alle falschen Asymmetrien durch die Verwendung des Spindrehmagneten auszuschalten. Es soll nun noch diskutiert werden, ob trotz der Verwendung des Spindrehmagneten unerwünschte Asymmetrien auftreten können oder denkbar sind. Die folgenden Effekte können unerwünschte Asymmetrien hervorrufen:

- a) Das Magnetfeld des Solenoiden kann den Deuteronenstrahl beeinflussen. Dies kann beim Umpolen des Magneten bewirken, daß z.B. der Reaktionswinkel bei den beiden Feldrichtungen nicht exakt gleich ist. Da die Magnetfeldmessungen zeigten, daß die Feldstärke in einem Abstand von 10 cm vom Magnetende nur die doppelte Stärke des Erdfeldes hat, kann dieser Effekt vernachlässigt werden.
- b) Die Verstärkung der Szintillationsdetektoren kann durch das Streufeld des Magneten beeinflusst werden. Da der Abstand zwischen Magnet und Detektoren 3,30 m betrug, gilt das gleiche Argument wie unter a). Dieser Einfluß ist infolgedessen bedeutungslos.
- c) Ein Umschalten des Magnetfeldes kann die Bahn der Neutronen verändern. In den Bereichen mit inhomogenem Magnetfeld wirkt auf die Neutronen eine Kraft $\vec{K} = (\vec{m} \cdot \text{grad}) \vec{H}$ (\vec{m} magnetisches Moment, \vec{H} Feldstärke). Eine Abschätzung zeigte, daß den Neutronen beim Durchqueren des Magneten ein Impuls von 10^{-16} des Anfangsimpulses übertragen wird. Die entstehende Winkelablenkung kann folglich vernachlässigt werden.
- d) Der Spin der Neutronen kann in dem Magnetfeld um einen Winkel gedreht werden, der geringfügig von 90° abweicht. Auf Grund der genauen Ausmessung des Magnetfeldes ist $\int \vec{H} \cdot d\vec{l}$ auf 1% genau bekannt. Da nur der Kosinus des Drehwinkels in das Endergebnis eingeht, entspricht dieser Fehler einem Fehler von weniger als 1% im Polarisationswert.

- e) Die beiden Winkel, unter dem die Zähler stehen, können unterschiedlich sein. In diesem Falle liefern die beiden Zähler einzeln unterschiedliche Asymmetriewerte. Die Auswertung wurde aber so vorgenommen, daß nur der Mittelwert dieser beiden Winkel eingeht. Der Mittelwert wird aber durch den Abstand der beiden Zähler festgelegt und ist auf 0,2% bekannt. In dem Asymmetriewert entspricht dies einem Fehler von 1,5%. Außerdem wurden die Zähler optisch einjustiert, um die Fehler in den absoluten Winkelstellungen klein zu halten. Diese Zusatzbedingung ist notwendig, um die Fehler höherer Ordnung, die sich durch die Auswertemethode ergeben, klein zu halten.
- f) Die Intensitätsverteilung innerhalb des Deuteronenstrahles kann sich während einer Messung verändern. Damit ändert sich auch die Richtungsverteilung innerhalb des Neutronenstrahles und für beide Zähler gelten effektiv verschiedene Winkel. Dieser Fehler wird durch die Bildung des Mittelwertes aus den Asymmetrien der beiden Zähler in erster Näherung aufgehoben. Außerdem sind die Änderungen in der Richtungsverteilung der Neutronen sehr klein, da der Deuteronenstrahlfleck in der Streukammer einen Durchmesser von 2 mm hat.

Die bei konventionellen Doppelstreuexperimenten auftretenden Ursachen für unerwünschte Asymmetrien, nämlich erstens das Drehen der Zähler um eine falsche Achse, zweitens die Änderungen der Ansprechwahrscheinlichkeit beim Schwenken und drittens die ungleichmäßige Beleuchtung des Streuers werden bei der hier verwendeten Methode prinzipiell ausgeschaltet. Bei der Verwendung eines Spindrehmagneten bleiben nämlich die beiden Zähler in festen Positionen oberhalb und unterhalb des Strahles stehen.

Aus dieser Diskussion ergibt sich, daß durch die Verwendung eines Spindrehmagneten praktisch alle Fehler vermieden werden, die durch apparative Unsymmetrien entstehen können.

Literaturverzeichnis:

- 1) P. Hillman, G.A. Stafford and C. Whitehead, Nuovo Cim. 4 (1956) 67
- 2) D.N. Edwards and B. Rose, Nucl. Instr. 7 (1960) 135;
L. Bird, D.N. Edwards, B. Rose, A.E. Taylor and E. Wood,
Nucl. Phys. 42 (1963) 280
- 3) C. Wong, J.D. Anderson, J.W. McClure and B.D. Walker, Phys.Rev.
128 (1962) 2339
- 4) P.S. Dubbeldam and R.L. Walter, Nucl. Phys. 28 (1961) 414
- 5) J.R. Sawers, F.O. Purser and R.L. Walter, Phys. Rev. 141 (1966) 825
- 6) P.S. Dubbeldam, C.C. Jonker and F.J. Heemskerk, Nucl. Instr.
4 (1959) 234
- 7) G.P. Lietz, S.F. Trevino, A.F. Behof and S.E. Darden, Nucl.Phys.
67 (1965) 193
- 8) A.T.G. Ferguson and R.E. White, Nucl. Phys. 33 (1962) 477
- 9) L. Schänzler, Dissertation, Karlsruhe 1968;
H. Brückmann, W. Kluge und L. Schänzler, Z. Physik 221 (1969) 379
und KFK-Bericht 890 (1968)
- 10) J. Atkinson and J.E. Sherwood, Nucl. Instr. 34 (1965) 137