

KFK-46

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

MÄRZ 1961

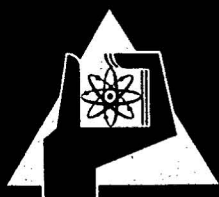
KFK 46

INSTITUT FÜR STRAHLENBIOLOGIE

MAGNETFELDMESSUNG MIT EINEM TRANSISTOR-SPINDETEKTOR

[Eswald]
O. MÜLLER

KERNREAKTOR



Magnetfeldmessung mit einem Transistor-Spindetektor

Von O. Müller Aus dem Institut für Strahlenbiologie, Kernforschungszentrum Karlsruhe

Zusammenfassung

Es wird ein Magnetfeld-Meßgerät beschrieben, das auf dem Kernresonanzprinzip beruht und mit fünf Transistoren und zwei Dioden bestückt ist. Durch Anwendung eines eingebauten FM-Modulators wird das Gerät sehr handlich und nach Anschluß der Meßsonde und des Oszillographen sofort betriebsbereit.

Da der Spindetektor auf den Feldstärkebereich einer Elektronenresonanz-Apparatur abgestimmt wurde, braucht der Hf-Oszillator nur den Frequenzbereich von 13–17 MHz zu umfassen, was wiederum der leichten Handhabung zugute kommt. Es wird eine kurze Erläuterung des Meßprinzips und der erzielbaren Meßgenauigkeit, die bei etwa 10^{-4} liegt, gegeben.

Einleitung

Für Messungen der magnetischen Feldstärke an einem Elektromagneten eines Elektronenresonanz-Spektrometers wurde ein Meßgerät entwickelt, das die Kernresonanzmethode anwendet. Für die Schaltung wurden Transistoren gewählt, die es erlauben, das tragbare Gerät vom Netz unabhängig zu machen, und daher auch keine Maßnahmen gegen Netzbrumm erfordern. Außerdem sind Transistoren auf Grund ihrer Konstruktion erschütterungsunempfindlicher als Röhren. Der von der Varian Ass., Palo Alto, USA, gebaute Mikrowellenspektrograph umfaßt neben der Mikrowelleneinrichtung einen elektronisch stabilisierten 12-Zoll-Elektromagneten mit einem Polschuhabstand von 2,5 Zoll. Der Arbeitsbereich liegt bei gegebener Klystronfrequenz von ca. 9500 MHz bei 3...4000 Oersted, die Feldstärke läßt sich von Hand oder zeitlich linear durch ein motorgetriebenes Präzisionspotentiometer verändern. Auf diesen Verwendungszweck wurde das Feldstärkemeßgerät zugeschnitten. Wegen fehlender Modulationsmöglichkeit des verwendeten Magneten und im Interesse einer nicht zu großen Sonde wurde auf zusätzliche Helmholtzspulen verzichtet und zur Frequenzmodulation des Oszillators [4] gegriffen. Dies besorgt eine spannungsabhängige Kapazität, die dem Schwingkreis parallel geschaltet ist. Ein mit Transistoren bestücktes Kernresonanzmeßgerät mit Frequenzmodulation durch variablen Kondensator wurde bislang in der Literatur noch nicht erwähnt.

Arbeitsweise

Auf die physikalischen Grundlagen möge hier nicht eingegangen werden, da hierfür ausgezeichnete Monographien [1, 2] vorliegen. Mit der Kerninduktionsmethode hat man ein genaues Verfahren zur Magnetfeldmessung in der Hand,

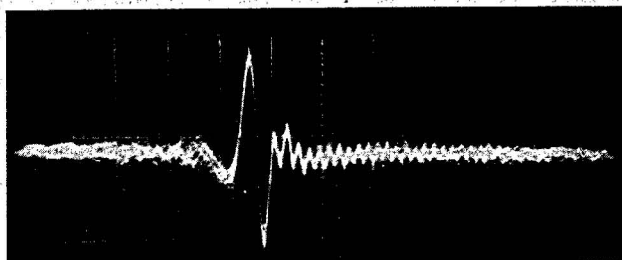


Abb. 2: Nach der Zeit aufgelöstes Glycerin-Protonensignal. Ablenkgeschwindigkeit 3 msec/cm, Signalamplitude $200 \text{ mV}_{\text{SS}}/\text{cm}$, Signal-Rauschverhältnis 10 : 1, Signalbreite: Spitze zu Spitze 0,3 Oersted.

dessen Genauigkeit nur von der exakten Bestimmung einer Frequenz ν abhängt. Diese Hochfrequenz ν wird von einem Transistor-Oszillator [3] erzeugt, dessen Schwingkreisspule die Meßsonde darstellt. Da es schwierig ist, die Amplitudenänderung bei Resonanz direkt festzustellen, überstreicht man die Resonanzstelle durch schnelles Verändern entweder des Gleichfeldes H_0 oder durch »wobbeln« der Hochfrequenz mittels einer »Sweep-Frequenz«. Durch diese Methode erhält man nach Demodulation eine der Kernabsorption entsprechende Wechsellspannung, die verstärkt und angezeigt wird. Zur Bestimmung der Feldstärke macht man das Protonensignal auf einem Katodenstrahloszillograph sichtbar, wobei die Zeitbasis so eingestellt wird, daß die Resonanzlinie dreimal abgebildet wird. Bei gleichen Abständen der Signale befindet man sich genau in Mitte der Kernabsorptionskurve (Abb. 1). Nun kann die Oszillatorfrequenz ν mit einer genau bekannten Meßfrequenz verglichen werden.

Die Resonanzgleichung lautet

$$h\nu = g_{\text{pr}} \cdot \mu_K \cdot H_0 \quad (1)$$

Hierbei bedeutet

h = das Planck'sche Wirkungsquantum,

g_{pr} = der sog. g-Wert des Protons,

μ_K = die Einheit für das magnetische Moment der Kerne und

H_0 = das zu messende Feld.

Die Feldstärke ermittelt sich dann aus

$$H_0 = 2,3487 \cdot 10^{-4} \cdot \nu \quad (2)$$

wobei H_0 in Oersted und ν in Hertz einzusetzen sind.

Werte der Bauelemente des Spindetektors

C 1	350 pf	C 7	22 nf	C 13	10 uf
C 2	150 pf	C 8	8 uf	C 14	10 uf
C 3	10 pf	C 9	0,22 uf	C 15	10 uf
C 4	0...60 pf	C 10	0,22 uf	C 16	80 pf
C 5	20 nf	C 11	4 uf	C 17	10 uf
C 6	15 nf	C 12	20 pf		
R 1	51 Ω	R 6	8,2 K	R 11	3,3 K
R 2	4,7 K	R 7	3,3 K	R 12	4,7 K
R 3	47 K	R 8	6,8 K	R 13	68 K
R 4	1 M	R 9	15 K	R 14	15 K
R 5	1 M	R 10	39 K	R 15	10 K
R 16	22 K	R 21	470 Ω	P 1	5 K
R 17	4,7 K	R 22	8,2 K	P 2	5 K
R 18	10 K	R 23	2,2 K		
R 19	2,2 K	R 24	470 Ω		
R 20	2,7 K				

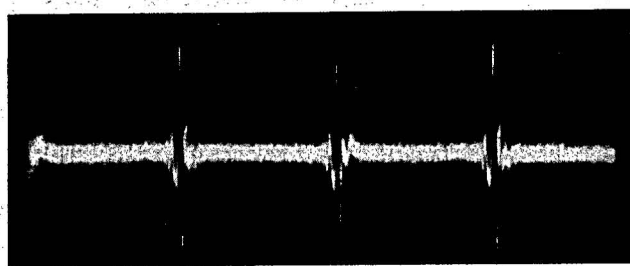


Abb. 1: Korrekte Stellung des Glycerin-Protonensignals auf dem Oszillographen zum Frequenzvergleich.

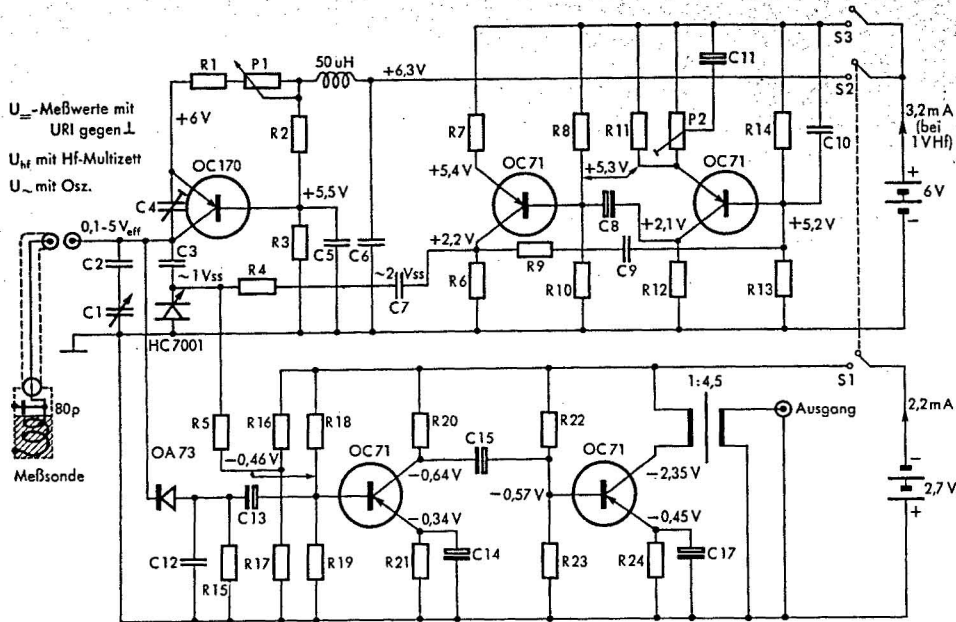


Abb. 3: Schaltbild.

Schaltungstechnik

Der abstimmbarer Hf-Oszillator (Abb.3) ist mit dem Transistor OC 170 bestückt und arbeitet in Basisschaltung. Die Rückkopplung erfolgt über den Trimmer C_4 vom Kollektor zum Emitter. Die Hf-Amplitude läßt sich durch den Regler P_1 in der Emitterzuleitung von $0,1 \dots 5 V_{eff}$ verändern. Dies ist für ein optimales Signal-Rausch-Verhältnis wichtig. Eine Eichung der Skala kann nur grob erfolgen, da durch die Amplitudenregelung auch eine Frequenzbeeinflussung stattfindet. Die genaue Messung erfolgt durch Überlagerung mit einer Standard-Frequenz, die Meßdauer ist verhältnismäßig kurz, so daß auf besondere Stabilisierungsmaßnahmen verzichtet werden kann. Die Frequenzschwankungen betragen über längere Zeiträume etwa ± 250 Hz, entsprechend $\pm 0,05$ Oersted. Ein Schalter S_3 gestattet, die Modulation beim Frequenzvergleich abzuschalten. Man erhält dadurch einen besser beobachtbaren Schwebungsvorgang.

Die Frequenzmodulation geschieht durch einen spannungsabhängigen Silizium-Kondensator vom Typ HC 7001 der Fa. Hughes Semiconductors. Durch den Spannungsteiler $R_{16}-R_{17}$ erhält die Diode eine Vorspannung von $0,46$ V, die den Arbeitspunkt festlegt. Derselbe liegt im steilsten Gebiet der Kennlinie, so daß sich mit kleinen Modulationsspannungen große Kapazitätsänderungen ergeben. Dies ist

wichtig, da man sonst die Modulation über C_3 auf den Anzeigeverstärker bekommt und das Absorptionssignal verdeckt. Eine Sweepspannung von etwa $1 V_{SS}$ an der Diode HC 7001 ergab die beste Signalform.

Die Sweep-Frequenz wird in einem zweistufigen RC-Generator mit den Transistoren OC 71 erzeugt, die Nf-Amplitude läßt sich durch den Regler P_2 auf günstigste Signalform bringen. Die Sweep-Frequenz von ca. 80 Hz hat sich als sehr brauchbar erwiesen.

Die mit 80 Hz modulierten Spannungsänderungen der Hf-Amplitude bei Resonanz werden durch eine Germaniumdiode OA 73 demoduliert und einem zweistufigen RC-Verstärker mit 2 · OC 71 zugeführt. Am Trafoausgang stehen je nach Hf-Amplitude eine Spannung von $1 \dots 4 V_{SS}$ zur oszillographischen Anzeige zur Verfügung (Abb. 2).

Als Stromversorgung für die beiden Oszillatoren dient eine Nickel-Cadmium-Zelle vom Typ DEAC 6 V, 225 mAh, da diese während der Entladezeit eine sehr konstante Spannung liefert. Für den Verstärker wurde eine Trockenbatterie Mallory 2,7 V verwendet.

Aufbau und Meßsonde

Der Feldstärkemesser findet bequem in einem Stahlblechgehäuse mit den Abmessungen $210 \cdot 140 \cdot 115$ Platz (Abb. 4).

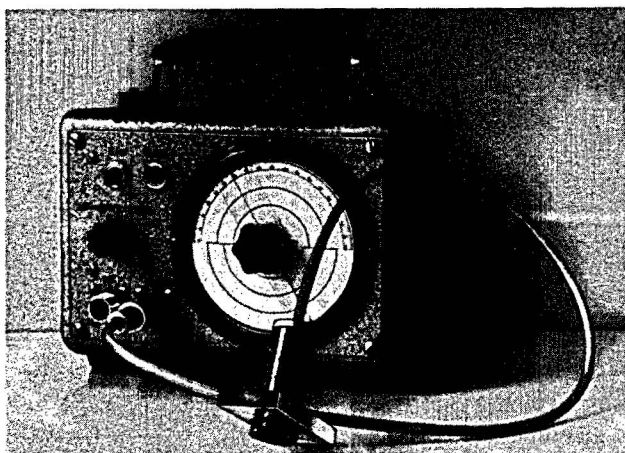


Abb. 4: Außenansicht des Spindeldetektors, davor die abgeschirmte Meßsonde.

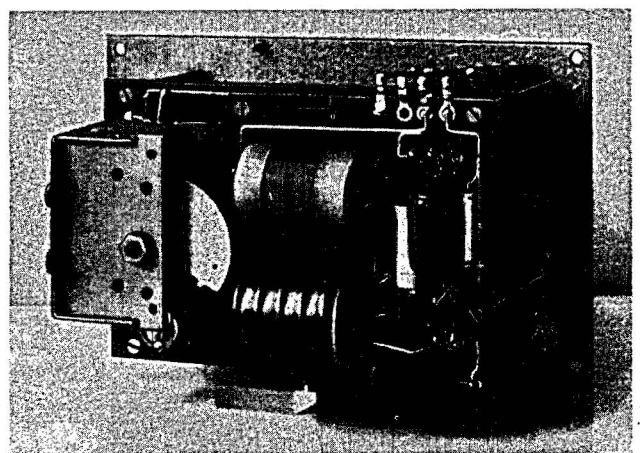


Abb. 5: Chassisansicht.

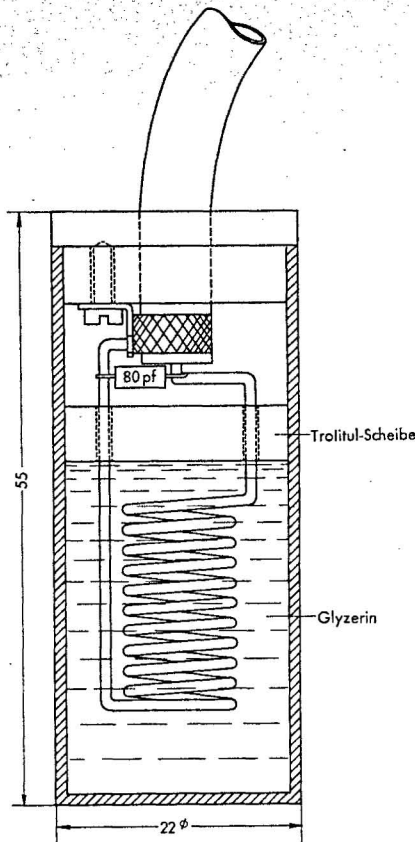


Abb. 6: Aufbau der Meßsonde.

Als Chassis wird 2 mm dickes Superpervinax verwendet. Eine Platte nimmt Hf-Oszillator und Verstärker auf, während die obere Platine den NF-Generator und die Stromversorgung trägt. Beide Chassis sind durch Abstandsbolzen mit der Frontplatte verbunden (Abb. 5). Die Meßsonde besteht aus Spule, Glycerin als »Meßflüssigkeit« und der Abschirmung. Obwohl Glycerin kein so großes Signal wie zum Beispiel Wasser mit Zusätzen paramagnetischer Ionen liefert, besitzt es den Vorteil, ein besseres Dielektrikum als Wasser zu sein. Außerdem kann man die ganze Sonde ohne nachteilige Wirkungen damit füllen und so das Spulen-Volumen voll ausnützen. Die Spule hat 10 Windungen aus 0,8 mm versilbertem Schmelzdraht mit einem Durchmesser von 10,5 mm

und einer Länge von 20 mm (Abb. 6). Zur Abschirmung sollen nur reine Nichteisenmetalle verwendet werden, auch das Abschirmkabel darf keinerlei Eisen enthalten, weil durch Feldverzerrungen die Signalbreite und damit auch die Nachweisbarkeit der Kernabsorption beeinträchtigt wird. Das Zuleitungskabel hatte bei 0,75 m Länge eine Kapazität von ≈ 50 pf, die in den Schwingkreis eingeht. Durch eine kleine Zusatzkapazität von 80 pf erhält man einen Frequenzbereich von 12,9 ... 17,1 MHz, einer Feldstärke von 3 ... 4000 Oersted entsprechend. Die Meßsonde kann durch eine Plexiglashalterung in Luftspaltmitte des Magneten fixiert werden.

Die Meßgenauigkeit

Die Genauigkeit der Feldstärkemessung hängt ab: 1. von der Unsicherheit der g-Wertbestimmung, 2. von der Genauigkeit, mit der die richtige Oszillatorfrequenz eingestellt werden kann, und 3. von Fehlern, die bei der Frequenzmessung auftreten.

Der g-Wert des Protons wurde von verschiedenen Arbeitsgruppen mit einer relativen Genauigkeit von etwa $1,5 \cdot 10^{-5}$ ermittelt. Die zur Resonanz gehörige Oszillatorfrequenz wird so eingestellt, daß die Protonenresonanz bei jedem Nulldurchgang der sinusförmigen Sweep-Frequenz erscheint. Dies wird durch Einstellung gleicher Abstände von drei zeitlich aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen auf dem Oszillosographenschirm beobachtet. Die Genauigkeit dieser Einstellung wird letzten Endes von der Linienbreite der Resonanz bestimmt, die etwa 0,5 Oersted beträgt. Da das Linienzentrum mit einer Genauigkeit von 0,1 der Linienbreite relativ leicht zu bestimmen ist, so wird die bestimmende Unsicherheit etwa von der Größe 0,05 Oersted bei 3500 Oersted. Daraus ergibt sich eine resultierende Genauigkeit von rund 10^{-4} . Die Vergleichsfrequenz wird keinen Fehler in die Feldstärkebestimmung bringen, da quartzstabilisierte Oszillatoren eine Frequenzkonstanz von einigen 10^{-5} , zusätzlich thermostabilisierte Generatoren bis zu 10^{-8} (z. B. Normalfrequenz-generator XUA von Rohde & Schwarz) aufweisen.

Literatur:

- [1] Andrew, E. R.: Nuclear Magnetic Resonance. Cambridge at the University Press 1955
- [2] Lösche, A.: Kerninduktion. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1957
- [3] Singer, J. R.: Transistored Nuclear Resonance Magnetic Field. Probe. Rev. Sci. Instr. Vol. 30, No. 2, 92
- [4] Jennings, D. A., W. H. Tantilla: Frequency modulator for a marginal oscillator. Rev. Sci. Instr. Vol. 30, No. 2, 1937