

Versuch 316

Magnetfeldmessungen

1. Aufgaben

- 1.1 Die magnetische Induktion B eines Elektromagneten auf der Polschuhachse ist mit einer Hall-Sonde in Abhängigkeit vom Magnetisierungsstrom für unterschiedliche Polschuhabstände zu messen und grafisch darzustellen.
- 1.2 Die Abhängigkeit der magnetischen Induktion vom Abstand zur Polschuhachse ist zu messen.
- 1.3 Die spezifische magnetische Suszeptibilität eines paramagnetischen Salzes ist zu ermitteln.
- 1.4 (Zusatzaufgabe) Berechnen Sie aus der spezifischen Suszeptibilität das permanente magnetische Moment des Metallions und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Theorie.

2. Grundlagen

Stichworte:

Magnetische Induktion und Feldstärke, Lorentzkraft, Dia-, Para-, Ferromagnetismus, Suszeptibilität, Hall-Effekt

2.1 Magnetismus

Wird ein Stoff einem magnetischen Feld H ausgesetzt, so wird er magnetisiert. Die resultierende magnetische Induktion B setzt sich aus der magnetischen Feldstärke H und der Magnetisierung M der Probe, die bei vielen Materialien der magnetisierenden Feldstärke proportional ist, zusammen:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (H + \chi_m \cdot H) = \mu_0 \mu_r \cdot H \quad (1)$$

mit $\mu_r = (1 + \chi_m)$
 und $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/A m}$ (Induktionskonstante).

Die *relative Permeabilität* μ_r bzw. die *magnetische Suszeptibilität* χ_m charakterisieren

die Stoffe hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften:

$\mu_r \leq 1$, d.h. $\chi_m \leq 0$ für Diamagnetika (z.B. Wasser)

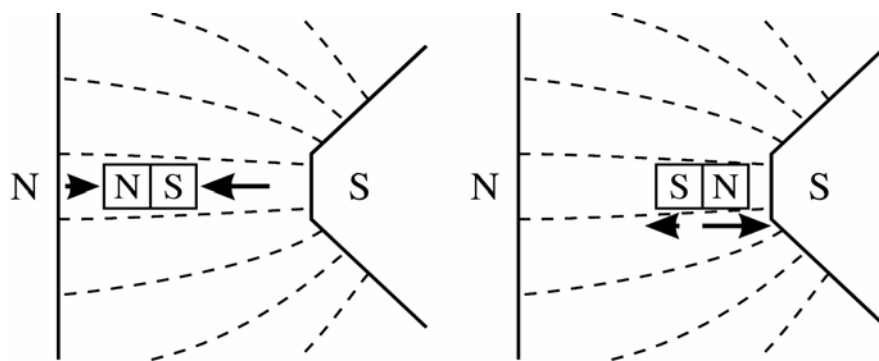
$\mu_r \geq 1$, d.h. $\chi_m \geq 0$ für Paramagnetika (z.B. CoCl_2 u. a. Salze)

$\mu_r \gg 1$ für Ferromagnetika

Im Vakuum ($\mu_r = 1, \chi_m = 0$) sowie näherungsweise auch in Luft gilt:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (2)$$

Die Eigenschaften dia- und paramagnetischer Stoffe zeigt folgende Übersicht



Diamagnet

- besitzt keine eigenen Dipole
- Dipole werden erst im Feld induziert (ihrer Ursache entgegengerichtet)
- Abstoßung → aus dem Gebiet hoher Feldstärke hinaus

Paramagnet

- Moleküle sind magnetische Dipole
- werden im Feld ausgerichtet (stabile Lage entlang der Feldlinien)
- Anziehung → in das Gebiet hoher Feldstärke hinein

Bild 1: Eigenschaften dia- und paramagnetischer Stoffe

Es ist dabei zu beachten, daß Diamagnetismus prinzipiell bei allen Stoffen auftritt, dieser jedoch bei Paramagneten durch die Ausrichtung bereits vorhandener Dipole überdeckt wird (vgl. dazu auch /11/, Abschnitt „Diamagnetismus und Paramagnetismus“)

2.2 Elektromagnete

Ein Elektromagnet besteht aus einer stromdurchflossenen Spule und einem ferromagnetischen Kern. Im Versuch ist der Kern ringförmig mit einem Spalt, dessen Breite d variiert werden kann. Bei kleinem d ist das Magnetfeld zwischen den Polen dieses

Elektromagneten in der Nähe der Achse homogen. Die Feldlinien stehen senkrecht zu den Polflächen.

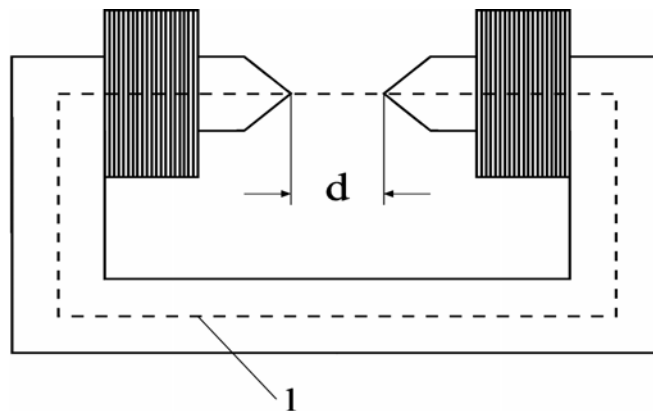


Bild 2: Zur Berechnung der Feldstärke im Spalt eines Elektromagneten

Beim Übergang vom Kern zum Luftspalt ändert sich die magnetische Induktion nicht. Es gilt:

$$B_i = B_a = B \quad (3)$$

Dagegen wächst die Feldstärke H_a um den Faktor μ_r der von der Größenordnung 1000 sein kann:

$$B = \mu_r \mu_0 H_i = \mu_0 H_a \quad (4)$$

Die Feldstärke ergibt sich aus der Anwendung des Durchflutungsgesetzes auf den im Bild 2 gestrichelt gezeichneten Integrationsweg, der alle vom Strom I_B durchflossenen N Windungen umfaßt:

$$N I_B = \oint \mathbf{H} \, ds = |\mathbf{H}_i| \cdot l + |\mathbf{H}_a| \cdot d \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung von (4) folgt:

$$|\mathbf{H}_a| = H_a = \frac{N \cdot I_B}{d + l/\mu_r} \quad (6)$$

In unserem Versuchsaufbau umschließen die Wicklungen nur einen Teil des Eisenkerns, so daß diese Formel nur näherungsweise gilt.

2.3 Hallsonde

Zur Messung magnetischer Feldstärken kann man den Hall-Effekt ausnutzen. Durch ein quaderförmiges Halbleiterplättchen der Dicke d fließe ein Strom I (Bild 3).

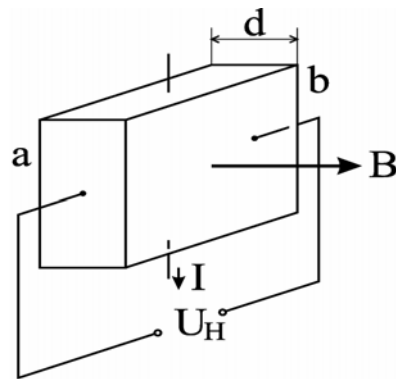


Bild 3: Hall-Effekt

Im B-Feld werden die Elektronen entsprechend der Lorentz-Kraft abgelenkt, so daß es auf den Kontaktflächen a und b zur Anreicherung bzw. Verarmung von Ladungsträgern kommt. Die dadurch entstehende Potentialdifferenz nennt man Hall-Spannung U_H . Es gilt

$$U_H = \frac{R_H I B}{d} \quad (7)$$

R_H ist die stoffspezifische Hallkonstante. Sind R_H , I und d bekannt, so kann durch Messung von U_H die magnetische Induktion B bestimmt werden. Halbleiter haben im Vergleich zu Metallen eine sehr große Hall-Konstante und werden deshalb für Hallsonden verwendet.

2.4 Steighöhenmethode

Die Quinckesche Steighöhenmethode ist ein Standardverfahren zur Messung magnetischer Suszeptibilitäten.

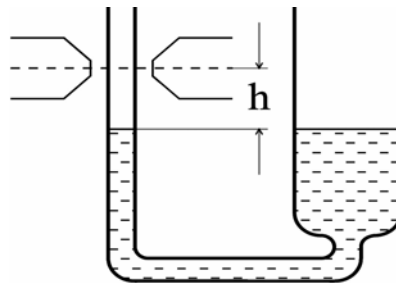


Bild 4: Quinckesche Steighöhenmethode

Der eine Schenkel eines U-Rohres, das mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt ist, befindet sich zwischen den Polen eines Elektromagneten, der zweite ist im feldfreien Raum. Nach Einschalten des Magnetfeldes wird die paramagnetische Flüssigkeit

in das Gebiet maximaler Feldstärke hineingezogen. Der Flüssigkeitsspiegel im dünnen Schenkel steigt um den Betrag h an. Für die spezifische Suszeptibilität der Flüssigkeit erhält man:

$$\frac{\chi_m}{\rho} = \frac{2 g \mu_0 h}{B^2} \quad (8)$$

(g ... Schwerebeschleunigung, ρ ... Dichte der Flüssigkeit)

Bemerkung:

Die magnetische Feldstärke H ist im Luftspalt sehr groß (vgl. 2.2). Entsprechend groß ist die Energiedichte $\frac{E}{V} = \frac{1}{2} H \cdot B$ des Feldes. Durch Hineinziehen eines Stoffes mit $\mu_r > 1$ in den Luftspalt wird H und damit die Energiedichte kleiner, d.h. das System erreicht einen stabileren Zustand.

$$\frac{E}{V} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} \quad (\text{mit Flüssigkeit})$$

Es gilt:

$$\frac{E}{V} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \quad (\text{ohne Flüssigkeit})$$

Die Differenz (Abnahme der Energiedichte) beträgt:

$$\Delta \left(\frac{E}{V} \right)_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \left(\frac{1}{\mu_r} - 1 \right)$$

und nach Umformung ($\mu_r \approx 1$):

$$\Delta \left(\frac{E}{V} \right)_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} (1 - \mu_r)$$

Die Abnahme der Feldenergie ist gleich der Zunahme an mechanischer (potentieller) Energie, d.h.

$$-\Delta \left(\frac{E}{V} \right)_{\text{mag}} = \Delta \left(\frac{E}{V} \right)_{\text{mech}}$$

oder

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0} \cdot \chi_m = \rho \cdot g \cdot h$$

Durch Umstellen nach $\frac{\chi_m}{\rho}$ folgt Gl.8

Mischungen und Lösungen besitzen, falls beim Lösungsvorgang die Bestandteile keine Veränderungen erfahren, eine spezifische Suszeptibilität, die sich additiv aus denen der Partner zusammensetzt. Wenn $\chi_m^{(1)}/\rho_1$ und $\chi_m^{(2)}/\rho_2$ die spezifischen Suszeptibilitäten des gelösten Stoffes bzw. des Lösungsmittels und p die Gewichtsprozent der gelösten Substanz sind, gilt für die Lösung

$$\frac{\chi_m}{\rho} = \frac{1}{100} \left[p \frac{\chi_m^{(1)}}{\rho_1} + (100 - p) \frac{\chi_m^{(2)}}{\rho_2} \right] \quad (9)$$

Paramagnetisch		Diamagnetisch	
Stoff	χ_m / ρ	Stoff	χ_m / ρ
Aluminium	7.78	Wasser	- 9.00
Platin	15.40	Benzol	- 9.10
Kobaltchlorid	1280	Kupfer	- 1.00
Mangansulfat	813	Gold	- 1.87

Tabelle 1: Spezifische magnetische Suszeptibilität einiger Stoffe [χ_m/ρ in $10^{-9} \text{m}^3/\text{kg}$]

3. Versuchsdurchführung

3.1 Zur Stromversorgung des Elektromagneten dient ein Regelgleichrichter. Dabei darf der Netzschalter (Ein/Aus) nur betätigt werden, wenn der Reglerknopf am Gerät auf Null gestellt ist! Beim Einstellen des Polschuhabstandes ist darauf zu achten, daß die dazu dienenden Handräder nur im feldfreien Zustand ($I = 0$) betätigt werden.

Technische Daten der Elektromagneten: $N = 2400$, $l = 1.22 \text{ m}$, $\mu_r \approx 500$ (Maximalwert μ_r ist feldstärkeabhängig!)

Es wird vorgeschlagen, die Messungen bei Aufgabe 1.1 für einen kleinen (4 ... 6 mm) sowie einen großen Polschuhabstand (10 ... 15 mm) durchzuführen. Die Stromstärke I soll 10 A nicht überschreiten.

Bei 1.2 sind die Parameter so zu wählen, daß sich (besonders mit Blick auf 1.3) Aussagen über die Homogenität des Feldes treffen lassen.

3.2 Das U-Rohr mit der zu untersuchenden Salzlösung (CoCl_2 , 15-prozentig) ist so anzuordnen, daß das dünne Rohr senkrecht zwischen den Polschuhen steht. Der Abstand zu den Polschuhen soll auf beiden Seiten etwa 0.5 ... 1.0 mm betragen. Der Flüssigkeitsmeniskus soll etwas oberhalb der Polschuhachse stehen. Man schaltet das Feld ein und dreht das U-Rohr soweit herunter, bis sich der Meniskus im Zentrum des Feldes befindet. Schaltet man das Feld aus, so sinkt der Flüssigkeitsspiegel um den Wert h , der mit einem Kathetometer gemessen wird. Anschließend wird das bei dieser Messung verwendete B-Feld ermittelt.

Den Wert für die spezifische Suszeptibilität der Lösung erhält man nach Gl. 8, den des Salzes durch Umstellen von Gl. 9.

Führen Sie eine Größtfehlerabschätzung durch, und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem erwarteten Wert!

3.3 Hinweise zur Zusatzaufgabe erhalten Sie von Ihrem Assistenten.