E 19 Magnetfeld und Suszeptibilität

1. Aufgabenstellung

1.1 Magnetfeldmessungen

Bestimmen Sie die Stärke und räumliche Verteilung des Magnetfeldes eines Elektromagneten.

1.2 Suszeptibilitätsmessung

Bestimmen Sie die magnetische Suszeptibilität vorgegebener Stoffe nach der Methode von GOUY.

2. Theoretische Grundlagen

Stichworte zur Vorbereitung:

Magnetische Induktion **B**, magnetische Feldstärke **H**, magnetischer Fluss Φ, magnetische Suszeptibilität χ, Magnetismus, ballistisches Galvanometer

Literatur:

F. X. Eder	Moderne Messmethoden der Physik, Band 3, Elektrophysik, Kap. 12.1., Deutscher Verlag der Wissenschaften 1972, Berlin
W. Ilberg, M. Krötzsch	Physikalisches Praktikum, 9. Auflage. Kap. E 4, Teubner 1992
Bergmann - Schäfer	Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2, Kap. 4.3., 7. Auflage, W. de Gruyter 1987
W. H. Westphal	Physikalisches Praktikum, 13. Auflage, Kap. 5, Elektrizität u. Magnetismus, Aufgabe 41, 44, 45, Vieweg 1971

Für die Beschreibung magnetischer Felder werden der übersichtlicheren Darstellung wegen oft zwei Feldgrößen eingeführt. Die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ ist bestimmt durch die das Feld hervorrufenden Ströme (Durchflutungsgesetz), die magnetische Induktion $\vec{B}$ beschreibt die Wirkung des magnetischen Feldes (Induktionsgesetz, LORENTZ-Kraft). Im Vakuum hängen diese beiden Größen über die Beziehung

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \tag{1}$$

in sehr einfacher Weise zusammen.

Wird Materie in ein magnetisches Feld gebracht, so wird sie magnetisiert. Man beschreibt diesen Zustand durch die magnetische Polarisation $\vec{J}$. In der Materie gilt dann für den Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke $\vec{H}_m$ und der magnetischen Induktion $\vec{B}_m$

$$\vec{B}_m = \mu_0 \vec{H}_m + \vec{J} \quad . \tag{2}$$

Die magnetische Polarisation $\vec{J}$ ist bei vielen Stoffen proportional zur magnetischen Feldstärke (ausgenommen sind nichtlineare magnetische Werkstoffe wie z. B. Ferromagnetika). Es gilt dann

$$\vec{J} = \chi_m \mu_0 \vec{H}_m \quad , \tag{3}$$

und mit Gl. (2)

$$\vec{B}_m = (\chi_m + 1)\, \mu_0 \vec{H}_m = \mu_r \mu_0 \vec{H}_m \quad . \tag{4}$$

Die Proportionalitätsfaktoren χ_m (magnetische Suszeptibilität) und μ_r(relative Permeabilitätszahl) sind dimensionslose Materialkonstanten.

In Gl. (4) ist $\vec{H}_m$ die in dem Material wirksame magnetische Feldstärke. Für die uns hier interessierenden Fälle ist stets $\chi_m \ll 1$. Dann ist $\vec{H}_m$ gleich der von außen angelegten Feldstärke $\vec{H}$. Aus Gl. (1) und Gl. (4) folgt somit

$$\mu_r = (\chi_m + 1) = B_m / B_0 \quad . \tag{5}$$

Werkstoffe können nach ihrem Verhalten im Magnetfeld eingeteilt werden in:

– *diamagnetische Stoffe*

μ_r wenig kleiner als 1 bzw. χ_m geringfügig negativ, Beispiele: Cu, Bi, Pb;

- *paramagnetische Stoffe*

  μ_r wenig größer als 1 bzw. χ_m geringfügig positiv, Beispiele: Al, Pt, Ta;

- *ferromagnetische Stoffe*

  Zwischen $\vec{B}$ und $\vec{H}$ gilt ein komplizierter, nichtlinearer Zusammenhang. Beispiele: Co, Fe, Ni.

Betrachtet man eine Probe mit dem Volumen V und der relativen Permeabilität μ_{r2} in einem Magnetfeld $\vec{H}$, so ändert sich dessen potentielle Energie gegenüber einem Zustand ohne Probe um

$$\triangle W_{mag} = -(\mu_{r2} - \mu_{r1}) \frac{\mu_0}{2} \int_{(V)} \vec{H}^2 \, dV \quad . \tag{6}$$

μ_{r1} ist hier die relative Permeabilität im Feldraum ohne Probe.

In einem inhomogenen Magnetfeld wirkt auf eine Probe eine Kraft F_x, die sich aus der potentiellen Energie $d(\triangle W)$ bei einer Verschiebung der Probe um dx ergibt:

$$F_x = -\frac{d(\triangle W)}{dx} = \frac{\mu_0}{2} (\mu_{r2} - \mu_{r1}) \, A \int \frac{d}{dx} \vec{H}^2 \, dx \quad . \tag{7}$$

Bereits 1889 ist von GOUY vorgeschlagen worden, diese Kraft F_x zu messen und daraus nach Gl. (7) μ_{r2} zu bestimmen. Eine Probe P mit dem Querschnitt A wird dabei an einer Waage hängend zwischen die Pole eines Magneten gebracht. Die durch das Magnetfeld hervorgerufene Kraft wird als Gewichtsänderung an der Waage registriert.

Bei einfacher Magnetfeldgeometrie und wenn die Probe sich in der Symmetrieebene befindet (siehe Abb. 1), folgt mit $\mu_{r1} - \mu_{r2} = \chi_{m1} - \chi_{m2}$

$$F_x = \frac{\mu_0}{2} (\chi_{m2} - \chi_{m1}) \, A \, (H^2 - H_0^2) \quad . \tag{8}$$

Die letzte Umformung setzt ein Magnetfeld voraus, dass innerhalb eines gewissen Bereiches (zwischen den Polschuhen) einen konstanten Wert H annimmt und im

Außenbereich sehr schnell auf den kleinen, konstanten Wert H_0 absinkt. In Gl. (8) ist χ_{m2} die gesuchte Suszeptibilität der Probe und $\chi_{m1} = +4 \times 10^{-7}$ die Suszeptibilität von Luft.

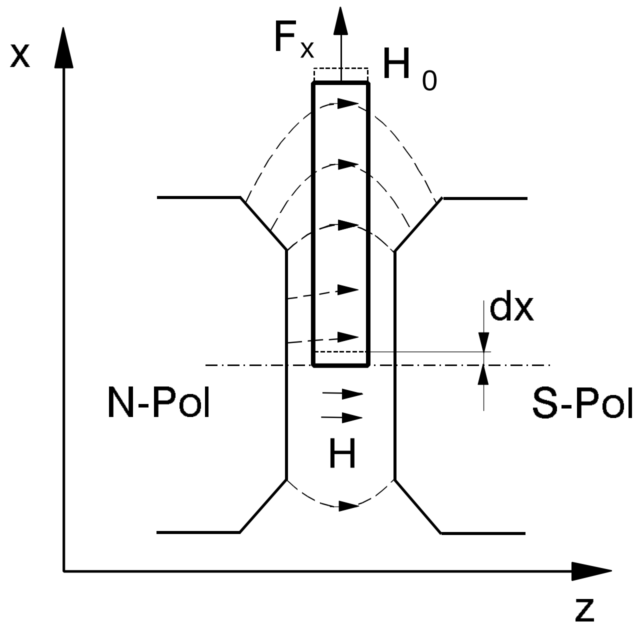

Abb. 1 : Versuchsaufbau (schematisch) zur Realisierung der GOUY - Methode

3. Versuchsdurchführung

3.1 Magnetfeldmessung

Der experimentelle Versuchsaufbau besteht aus einem Elektromagneten mit Stromversorgung und einem elektronischen Galvanometer zur Bestimmung des Magnetstromes. (Spannungsabfall über einen Messwiderstand). Ferner sind ein ballistisches Galvanometer und eine Probespule vorhanden, um die Magnetfeldstärke zu messen. Die Probespule mit gegebener Windungsfläche und Windungszahl wird zwischen die Polschuhe gebracht. Bei Änderung des Flusses Φ (Ein- oder Ausschalten des Magneten) wird in der Spule ein Spannungsstoß induziert, der als Stromstoß mittels eines ballistischen Galvanometers bestimmt werden kann.

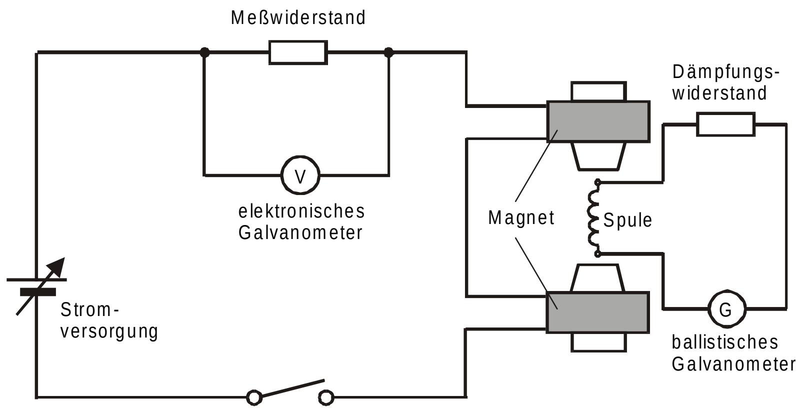

Abb. 2: Versuchsaufbau

Der erste maximale Ausschlag des (Licht-) Zeigers ist proportional zur Größe des Magnetfeldes. Es gilt

$$H = a_m \cdot \lambda \cdot \frac{R'}{\mu_0 A c_b N} \tag{9}$$

a_m - Skalenausschlag

c_b - ballistische Empfindlichkeit $\qquad c_b = c_i \cdot \frac{2\pi}{T}$

wobei T die Schwingungsdauer des ungedämpften Galvanometers und c_i die Stromempfindlichkeit des Galvanometers ist.

λ - dämpfungsbedingter Faktor $\qquad \lambda = e\left(\frac{\Lambda}{2\pi} \arctan \frac{2\pi}{\Lambda}\right)$

wobei Λ das logarithmisches Dekrement $\qquad \Lambda = \ln \frac{\Psi_n}{\Psi_{n+1}}$
ist.

Da die Messungen im aperiodischen Grenzfall durchgeführt werden, folgt $\Lambda \to \infty$ und für den dämpfungsbedingten Faktor ergibt sich $\lambda = e$.

A - Windungsfläche ($A = 1{,}395 \cdot 10^{-5}\ m^2$)

N - Windungszahl ($N = 100$)

R' - Gesamtwiderstand des Messkreises

$$R' = R_{Spule} + R_{Dämpfung} + R_{Galvanometer} + R_{Zuleitung}$$
$$2{,}1\Omega + 20\Omega + 10\Omega + 0{,}1\Omega$$

Zur Realisierung des aperiodischen Grenzfalls ist entsprechend der Angabe auf der Galvanometerskala ein Widerstand von 20Ω am Dekadenwiderstand einzustellen.

Wird eine für die vorliegende Messanordnung charakteristische Empfindlichkeitskonstante C eingeführt, so vereinfacht sich Gl. (9) zu

$$H = a_m \cdot C \tag{10}$$

mit
$$C = 1{,}3 \cdot 10^4 \; A \; m^{-1} \; Skt^{-1} \quad .$$

Bestimmen Sie bei einem vorgegebenen Polschuhabstand die Abhängigkeit des Magnetfeldes vom Erregerstrom sowie den radialen Verlauf des Magnetfeldes. Für Vergleichsmessungen steht ein Teslameter zur Verfügung.

3.2 Methode von GOUY

Für die Kraftmessung steht eine Fein-Waage zur Verfügung, die vor Beginn der Messungen zu justieren ist. Die Proben (Auswahl erfolgt durch den Assistenten) sind mit den vorgesehenen Halterungen an der Waage (Unterseite) anzubringen. Das untere Ende der Probe sollte dabei in der Nähe des Symmetriezentrums des Magneten, nahe der Probespule, sein. Anschließend sind die Polschuhe bis auf etwa 5 mm heran zudrehen.

Bestimmen Sie die Gewichtsänderungen (Kraftänderungen) bei Einwirkung eines Magnetfeldes auf die Probe. Nutzen Sie dafür 5 unterschiedliche Spulenströme bis zu 9 A. Ermitteln Sie gleichzeitig die für die Berechnung erforderlichen Magnetfeldstärken H und H_0, in dem Sie die zugehörigen Ausschläge am Galvanometer bestimmen.

4. <u>Auswertung</u>

- Stellen Sie die gemessenen Magnetfeldstärken in Abhängigkeit von der Stromstärke dar. Tragen Sie die zugehörigen Fehler ein.
- Stellen Sie die radiale Verteilung der Magnetfeldstärken dar und stellen Sie fest, inwieweit die Annahme eines konstanten Feldes zwischen den Polen gerechtfertigt ist.
- Berechnen Sie die Suszeptibilitätswerte der Stoffe und führen Sie eine Größtfehlerberechnung durch.

5. Kontrollfragen

5.1 Erläutern Sie das Messprinzip eines ballistisches Galvanometer?

5.2 Welche anderen Methoden zur Messung magnetischer Felder kennen Sie?

5.3 Informieren Sie sich über die Herleitung der Gl. (8).

5.4 Welche Arten von Magnetismus kennen Sie?

5.5 Wie kann man magnetische Felder abschirmen?