

2.2 Ferromagnetische Permeabilität

Stichwörter: Ferromagnetismus, Permeabilität, Magnetisierung, magnetische Feldstärke, magnetische Flussdichte, Hysterese, Sättigung, Koerzitivfeldstärke, Remanenz, Induktivität einer Spule mit Eisenkern, Parallelschwingkreis, Resonanz, Schwingungsamplitude im Parallelschwingkreis, Thomson-Formel, graphische Integration, Drossel, Ferrit.

1 Einführung

Der Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke H und der magnetischen Flussdichte bzw. Induktion B ist im Vakuum durch die Proportionalität

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (1)$$

gegeben. Bringt man nun Materie in das Magnetfeld, so lässt sich die dabei auftretende Veränderung der Induktion B durch eine ähnliche Gleichung beschreiben:

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

Darin ist μ_r die Permeabilitätszahl oder relative Permeabilität, die die Materialeigenschaften wiedergibt. Hierbei kann man drei große Gruppen von Stoffen unterscheiden, nämlich die diamagnetischen ($\mu_r < 1$), die paramagnetischen ($\mu_r > 1$) und die ferromagnetischen ($\mu_r \gg 1$) Materialien.

Bei den ferromagnetischen Stoffen ist nun jedoch die Permeabilitätszahl μ_r keine Konstante, sondern hängt in komplizierter Weise von der magnetischen Feldstärke H ab

$$\mu_r = \mu_r(H) \quad (3)$$

Diese Abhängigkeit hat im Prinzip den in Abb. 1 gezeigten Verlauf. Die vollständige Information über die ferromagnetischen Eigenschaften erhält man aus der Abhängigkeit der magnetischen Induktion B von der magnetischen Feldstärke H (Hysteresiskurve), die in Abb. 2 dargestellt ist. Bei völlig unmagnetischem Material (Punkt 0) wird als erstes die Neukurve bis zur Sättigungsinduktion B_s durchlaufen. Verkleinert man dann die magnetische Feldstärke H , so zeigt die Induktion B den im oberen Kurventeil dargestellten Verlauf. Dabei bleibt bei $H = 0$ noch eine Remanenzflussdichte (Remanenz) B_R übrig, und erst bei einer negativen Feldstärke (Koerzitivfeldstärke) H_c erreicht die Induktion B den Wert Null. Bei noch höheren negativen Feldstärken gelangt man ebenfalls in eine Sättigung ($-B_s$), von der man auf dem umgekehrten Weg, der durch den unteren Kurventeil dargestellt wird, wieder in die positive Sättigung gelangt.

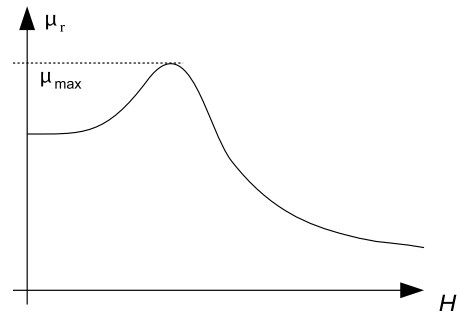


Abbildung 1: Permeabilität als Funktion der Feldstärke

2 Versuchsdurchführung

Zunächst wird die Abhängigkeit der Permeabilität eines ferromagnetischen Materials vom Gleichstrom-Magnetfeld H gemessen. Die Hysteresiscurve ergibt sich dann daraus durch Integration über die magnetische Feldstärke H :

$$B(H) = \mu_0 \int_{H_0}^H \mu_r(H) dH + B \quad (4)$$

Das zu untersuchende Material liegt in Form eines Ringkerns mit rechteckigem Querschnitt vor, auf den zwei verschiedene Wicklungen aufgebracht sind (siehe Abb. 3). Die linke Wicklung, die Erregerwicklung mit der Windungszahl n_e , ist an eine Gleichstromversorgung angeschlossen. Mit ihr wird im Ringkern ein Gleichstrommagnetfeld H erzeugt. Das vormagnetisierende Gleichfeld ergibt sich zu

$$H = \frac{n_e \cdot I}{l} \quad (5)$$

wobei l der mittlere Umfang des Ringkernes ist.

Die rechte Wicklung, die sog. Messwicklung mit der Windungszahl n_m , bildet mit dem Kondensator $C = 33nF$ einen Parallelschwingkreis. Die Induktivität der Messwicklung ist dabei von der Permeabilitätszahl $\mu_r(H)$ des Ringkerns abhängig und wird durch Bestimmung der Resonanzfrequenz f_0 über die Thomson-Formel berechnet. Dazu wird über einen Widerstand R von einem Niederfrequenzgenerator eine kleine Wechselspannung zugeführt. Die Messung der Resonanzfrequenz erfolgt mit dem Oszilloskop. Die Induktivität L der Messspule hat den Wert

$$L = \mu_r(H) \cdot \mu_0 \cdot \frac{A \cdot n^2}{l} \quad (6)$$

A ist dabei der Querschnitt des Ringkerns. Mit Hilfe der Thomson-Formel für die Resonanzfrequenz f_0 und der Gl. (6) ergibt sich der Zusammenhang

$$\mu_r(H) = \frac{K}{f_0^2} \quad (7)$$

Der Ringkern hat den inneren Durchmesser $d_i = 28,9 \pm 0,2$ mm, den äußeren Durchmesser $d_a = 51,1 \pm 0,2$ mm und die Höhe $h = 20,7 \pm 0,1$ mm. Die Windungszahlen sind $n_e = 230$ und $n_m = 2837$ Windungen.

Hinweis: Die Resonanzfrequenz lässt sich über die Darstellung der Lissajous-Figur auf dem Bildschirm eines Oszilloskops im X-Y-Betrieb bestimmen (wie im Versuch 2.1). Verbinden Sie V_x und V_y jeweils in Ch1 und Ch2 des Oszilloskops und ändern Sie die Oszillatorfrequenz bis Sie eine Gerade auf dem Bildschirm sehen.

Achtung: Der Versuchsaufbau darf nur unter Anleitung vorgenommen werden.

Aufgaben:

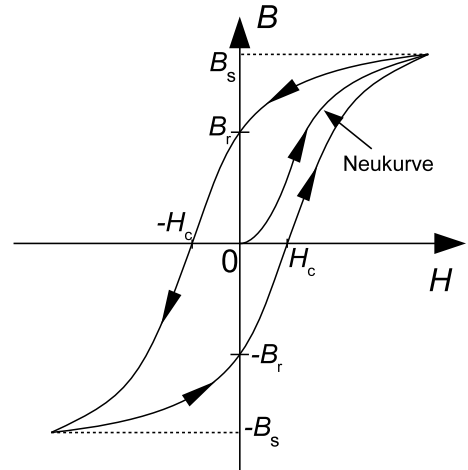


Abbildung 2: Hysteresiscurve

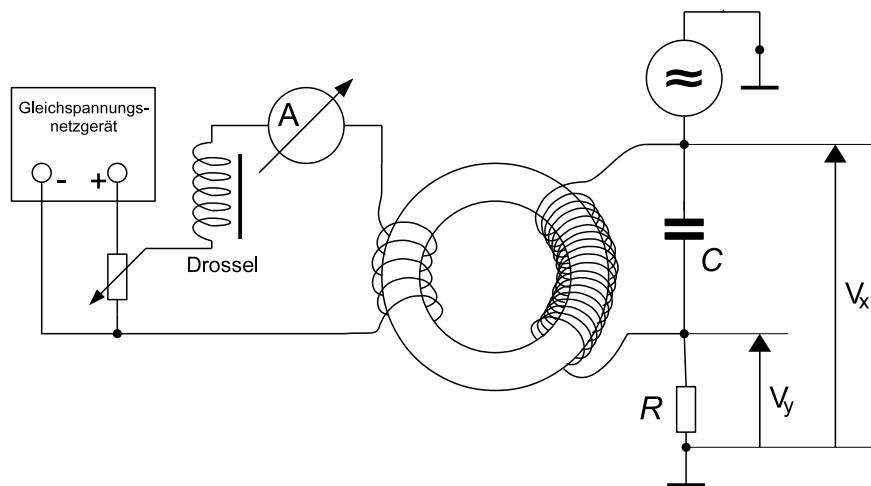


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Messung der Permeabilität

- 2.1 Berechnen Sie die Konstante K aus Gl.(7).
- 2.2 Messen Sie die Permeabilität μ_r als Funktion der Feldstärke H :
 - a) von der positiven Sättigung bis $H = 0$: Wählen Sie das magnetische Gleichfeld zunächst sehr hoch. Reduzieren Sie dann schrittweise das Magnetfeld bis zum Wert $H = 0$. Messen Sie dabei jeweils das dazugehörige μ_r .
 - b) Von $H = 0$ bis zur positiven Sättigung nach vorangegangener negativer Sättigung: Bringen Sie zunächst mit einem hohen negativen Wert des Gleichfeldes den Kern in die negative Sättigung. Reduzieren Sie dann das Feld monoton auf Null. Polen Sie jetzt die Anschlüsse für das Magnetfeld um, und messen Sie bei ansteigender Magnetfeldstärke μ_r bis in die positive Sättigung.
- 2.3 Fertigen Sie eine grafische Darstellung der beiden Messreihen $\mu_r = \mu_r(H)$ auf Millimeterpapier an. Tragen Sie dabei jeden μ_r -Wert sowohl bei $+H$ als auch bei $-H$ auf.
- 2.4 Ermitteln Sie aus den in 2.3 aufgetragenen Kurven für die Permeabilität durch grafische Integration die Hysteresiskurve $B = B(H)$ (siehe Gl.(4)). Es werden dazu die Kästchen unter den Kurven ausgezählt. Die so ermittelte Hysteresiskurve soll grafisch dargestellt werden. H_0 wird dabei zweckmäßigerweise als ein großer negativer Wert gewählt, bei dem die in 2.2.a und 2.2.b bestimmten Permeabilitäten übereinstimmen. Die Integrationskonstante $B_0 = B(H_0)$, die den Nullpunkt der Skala für B festlegt, ist zunächst noch unbekannt. Da bei einer Feldstärke $H = 0$ die Induktion gleich der positiven oder negativen Remanenz $B(0) = \pm B_R$ ist, erhält man den Nullpunkt genau in der Mitte zwischen den beiden Werten für $B(0)$.
- 2.5 Bestimmen Sie aus der Hysteresiskurve die Remanenz B_R (in Tesla = Vs/m^2) und die Koerzitivfeldstärke H_c (in A/m). Geben Sie außerdem einen ungefähren Wert für die Sättigungsinduktion B_s des Ferritmaterials an.

Literatur:

Demtröder: *Experimentalphysik 2*, Kap 3.5, 4.3, 5.4., 6. Auflage (2013)

Tipler, Mosca: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Kap 26.6, 7. Auflage (2015).

Geräte:

1 Ferrit-Ringkern mit Mess- und Erregerwicklung, 1 Gleichspannungsnetzgerät, 1 Potentiometer, 1 Drossel-
spule, 1 Vielfachmessinstrument, 1 Tonfrequenzgenerator, 1 Oszilloskop, 1 Kondensator (10nF), 1 Widerstand
(10 kΩ), diverse Kabel

3.2019/Ra,VdM