

Magnetfeld

E 4

1 Aufgabenstellung

1.1 Für einen magnetischen Eisenkreis mit Luftspalt ist die Hysteresekurve aufzunehmen.

1.2 Die Magnetflussdichte und die magnetische Feldstärke im Eisen sind zu bestimmen.

1.3 Die remanente Flussdichte, die Koerzitivfeldstärke, die maximale relative Permeabilität und die relative Permeabilität in der Sättigung sind zu ermitteln.

2 Physikalische Grundlagen

Für Stoffe, die sich in einem magnetischen Feld befinden, schreibt man:

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

Es bedeuten:

B die Magnetflussdichte, SI-Einheit $\text{Vs/m}^2 = \text{T}$ (Tesla)

M die Magnetisierung (des Stoffes) und

H die magnetische Feldstärke, SI-Einheit A/m
 $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$ die magnetische Feldkonstante,

μ_r die relative Permeabilität.

Achtung: Verwechslungsgefahr!

In der deutschsprachigen Tradition werden B als magnetische Flussdichte (auch magnetische Induktion) und H als magnetische Feldstärke bezeichnet.

Dagegen heißt im englischen Sprachraum (und manchmal auch in neueren deutschen Lehrbüchern) meist B magnetische Feldstärke! H wird dann H-Feld oder magnetische Erregung genannt.

Für nicht ferromagnetische Stoffe ist die Magnetisierung klein und proportional zur magnetischen Feldstärke; die relative Permeabilität μ_r ist eine Materialkonstante. Bei

ferromagnetischen Stoffen ist die Magnetisierung sehr groß und keine eindeutige Funktion der Feldstärke H , sie hängt vielmehr von der Vorbehandlung des Stoffes ab. Es kann eine remanente (zurückbleibende) Magnetisierung bei $H = 0$ existieren (siehe Abb.1). Unter diesen Umständen wird die Schreibweise $B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$ in (1) unsinnig. Für viele technische Anwendungen ist es trotzdem sinnvoll, eine relative Permeabilität anzugeben, welche dann differentiell definiert wird:

$$\mu_r \cdot \mu_0 = \frac{dB}{dH} \quad (2)$$

und sowohl von H als auch von der „Vorgeschichte“ abhängt.

Abb.1 gibt den Zusammenhang zwischen B und H (die Hysteresekurve) für ein typisches Ferromagnetikum wieder, welches zunächst im Punkt 0 unmagnetisiert sein soll. Von 0 bis P_1 wächst die Magnetflussdichte mit der Feldstärke, bis bei P_1 eine Sättigung erreicht ist (Neukurve). Wird nun H wieder verkleinert, so ergibt sich der Verlauf $P_1 - P_2 - P_3 - P_4$.

Bei $H = 0$ (P_2) bleibt der Stoff magnetisch, er besitzt das remanente Feld B_R . Die remanente Magnetisierung kann durch die Koerzitivfeldstärke H_C ($H_C < 0$) kompensiert werden; in P_3

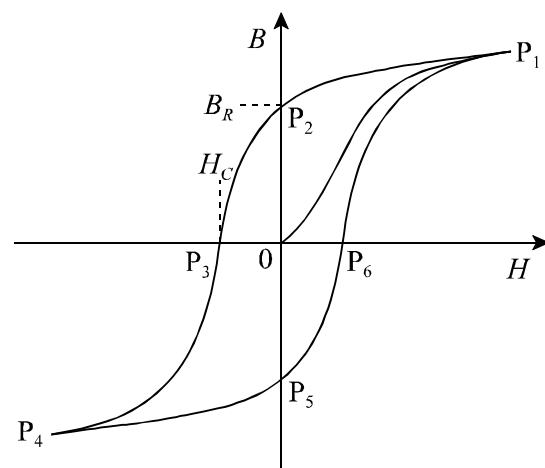


Abb.1: Hysteresekurve

ist $B = 0$. Wird von P_4 aus die Feldstärke vergrößert, so ergibt sich die Kurve $P_4 - P_5 - P_6 - P_1$.

Wir betrachten nun einen magnetischen Eisenkreis mit einem Luftspalt wie in Abb.2. Nach dem AMPÈRESchen Gesetz gilt für die Feldstärken H_L im Luftspalt und H_{Fe} im Eisenkern

$$H_L \cdot s_L + H_{Fe} \cdot s_{Fe} = N \cdot I \quad (3)$$

und die Flussdichte ist überall gleich:

$$B = B_L = B_{Fe} . \quad (4)$$

(N = Windungszahl, s_{Fe} = mittlere Länge im Eisen, s_L = Länge des Luftspaltes)

Mit $B_L = \mu_0 \cdot H_L$ ergibt sich daraus die Feldstärke im Eisen zu

$$H_{Fe} = \frac{N \cdot I}{s_{Fe}} - \frac{s_L \cdot B}{s_{Fe} \cdot \mu_0} . \quad (5)$$

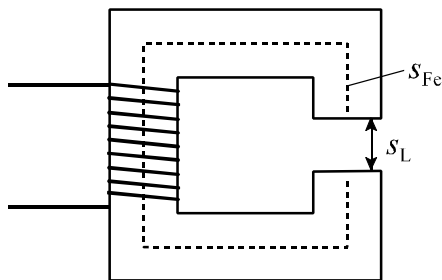


Abb.2: magnetischer Eisenkreis mit Luftspalt

3 Versuchsaufbau

3.0 Geräte:

- Eisenkern mit Spule, $N = 5455$ Windungen

- Permanentmagnet
- Motor mit Induktionsspule
- Messschieber
- Teslameter mit Hallsonde
- Stromversorgungsgerät
- 2 Digitalmultimeter
- Umschalter (Polwender)
- Verbindungsleitungen

3.1 Die Schaltung für den Versuchsaufbau zeigt die Abb.3. Das Stromversorgungsgerät liefert die Spannungen $U = 0 \dots 40$ V für die Magnetspule und $U_M = 18$ V für den Betrieb des Motors. Die Stromstärke I , die das Magnetfeld in der Spule erzeugt, kann mit dem Spannungsregler am Stromversorgungsgerät eingestellt werden. Die Richtung des Stromes lässt sich durch den Schalter S (Polwender) umkehren.

Die Magnetflussdichte B wird im Luftspalt L gemessen mit Hilfe der Induktionsspule IS , die durch den Motor M in Rotation versetzt wird. Die in IS induzierte Spannung U_{ind} ist proportional zu B . Zur Kalibrierung dieser Messeinrichtung wird ein Permanentmagnet verwendet. Die Induktion B' des Permanentmagneten wird mit Hilfe der Hallsonde des Teslameters bestimmt.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Bestimmen Sie s_{Fe} und s_L mit dem Messschieber und bauen Sie die Schaltung nach Abbildung 3 auf.

Zur Kalibrierung der Induktionsmesseinrichtung wird der Polschuh entfernt und

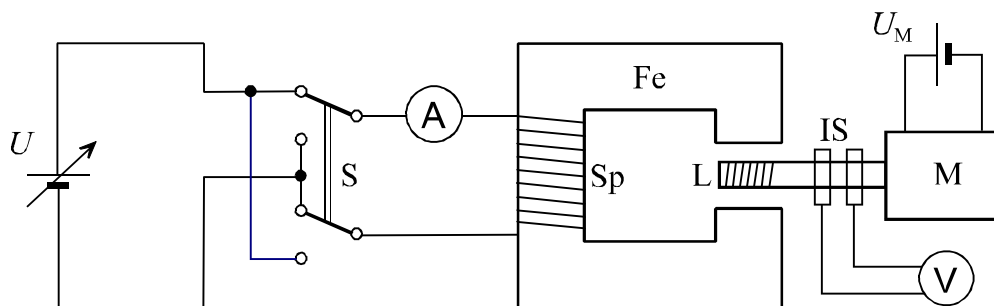


Abb.3: Versuchsaufbau

Permanentmagnet so an den unteren Schenkel des Eisenkerns Fe angebracht, dass die Induktionsspule IS frei in dem entstandenen Luftspalt rotieren kann. Die Motorspannung $U_M = 18 \text{ V}$ wird eingeschaltet, die induzierte Spannung U'_{ind} gemessen.

Danach wird die Induktionsspule aus dem Luftspalt entfernt und die magnetische Induktion B' im Spalt mit der Hallsonde bestimmt. Anschließend wird der Polschuh wieder montiert und der Motor mit Induktionsspule in den Luftspalt geschoben.

Zur Aufnahme der Hysterese-Kurve muss zunächst ein definierter Anfangszustand des Eisenkerns ($I = 0$; Kurve $P_5 - P_6$) erreicht werden. Dies geschieht, indem man den Strom I **langsam** von 0 bis zum Maximum (500...600 mA) vergrößert, danach **langsam** wieder auf 0 bringt, die Stromrichtung umkehrt (Umschalter S) und die ganze Prozedur mit negativem Strom wiederholt.

Danach kann die Aufnahme der Hysterese-Kurve beginnen. Dazu wird die Stromrichtung wieder umgepolt, die Stromstärke von 0 bis zum Maximum in 50 mA-Schritten eingestellt und die jeweilige induzierte Spannung U_{ind} gemessen (Kurve $P_5 - P_6 - P_1$). In der gleichen Weise wird der Kurvenverlauf $P_1 - P_2 - P_3 - P_4$ sowie $P_4 - P_5$ ermittelt. Beim Einstellen der Stromstärke darf diese (außer am Maximum) **nur** vergrößert oder **nur** verringert werden.

Beachten Sie, dass bei der Magnetflussdichte B im Verlauf der Messreihe Vorzeichenwechsel auftreten (siehe Abb.1), die jedoch in der Messgröße U_{ind} (Effektivwert) nicht sichtbar werden. Sie müssen U_{ind} nach jedem Nulldurchgang ein geändertes Vorzeichen zuordnen.

5 Auswertung

5.1 Stellen Sie die Messgrößen grafisch dar: U_{ind} (mit Vorzeichen) als Funktion von I .

5.2 Berechnen Sie die Flussdichte B nach

$$B = B' \cdot \frac{U_{ind}}{U'_{ind}}, \quad (6)$$

und die Feldstärke im Eisen H_{Fe} nach Gleichung (5) und zeichnen Sie die Hysterese-Kurve $B(H)$.

5.3 Aus der Hysterese-Kurve sind die remanente Flussdichte B_R und die Koerzitivfeldstärke H_C zu ermitteln. Aus dem Anstieg der Hysteresekurve sind entsprechend (2) die relativen Permeabilitäten μ_r im Maximum (Punkte P_3 und P_6) sowie in der Sättigung (Punkte P_1 und P_4) zu ermitteln.

6 Literatur

Dieter Meschede: Gerthsen Physik, Springer, Berlin u.a. 2010

Wolfgang Demtröder: Experimentalphysik 2, Springer Verlag 2013

7 Kontrollfragen

7.1 Was versteht man unter Dia-, Para- und Ferromagnetismus?

7.2 Wie ist die Induktion einer Spannung in der Spule IS (Abb.3) zu erklären?

7.3 Was ist eine Hallsonde?