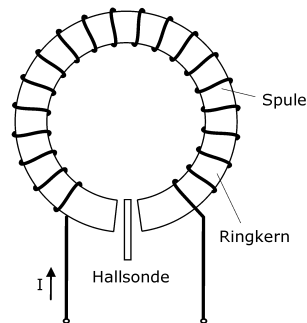
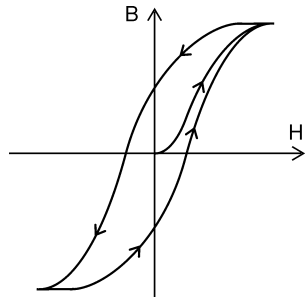


MAGNETISCHE HYSTERESE

GP II



Stichworte

Magnetische Induktion; Dia-/Para-/Ferromagnetismus; Hysterese; Koerzitivfeldstärke; Remanenz; Permeabilität; Hall-Effekt

Ziele des Versuchs

Einführung in Ferromagnetismus und Verständnis der Magnetisierung von Materie

Literatur

/1/ Bergmann-Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band II, Elektrizität und Magnetismus; de Gruyter Verlag

/2/ W. Demtröder: Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik; Springer Verlag

/3/ Brandt-Dahmen: Elektrodynamik; Springer Verlag

Aufgaben

1. Messung der magnetischen Flussdichte (B) eines Ringkernes (Stahl) in Abhängigkeit der angelegten magnetischen Feldstärke (H)
 - 1.1 Neukurve (unmagnetisierter Ringkern)
 - 1.2 Hysteresekurve
 - 1.3 Graphische Darstellung und Bestimmung der charakteristischen Größen
2. Aufnahme der Hysteresekurve bei größerem Luftspalt und Vergleich mit den zuvor gemessenen Werten
3. Untersuchung eines Ferritkerns im Vergleich zu Stahl und Diskussion der Unterschiede
4. Untersuchung der Positionsabhängigkeit der Hallsonde und Skizzierung der magnetischen Feldlinien

Physikalische Grundlagen

Magnetismus

Magnetismus ist eine grundlegende Eigenschaft aller Elemente. Man unterscheidet zwischen Dia-, Para- und Ferromagnetismus:

Diamagnetisch: Die Atome haben kein magnetisches Moment

Paramagnetisch: Die magnetischen Momente der Atome sind zufällig ausgerichtet.

Ferromagnetismus: Die magnetischen Momente der Atome sind parallel zueinander.

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben. Zu Spulen aufgewickelte Leiter haben im Inneren der Spule ein nahezu homogenes, im Äußeren ein schwaches, inhomogenes Magnetfeld. Bei ausreichend langen Spulen mit hoher Windungszahl ist die magnetische Feldstärke H proportional zum Strom.

$$(1) \quad |\vec{H}| = \frac{I \cdot N}{l}$$

H = Magnetische Feldstärke

Einheit: A/m

I = Stromstärke

N = Windungszahl der Spule

l = Länge der Spule

Kenngößen

Die magnetische Flussdichte (Induktion) B ist ein Maß für die Stärke des magnetischen Feldes an einer bestimmten Stelle. Im Vakuum ist B_0 proportional zur Feldstärke:

$$(2) \quad \vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$$

B_0 = Magnetische Flussdichte im Vakuum

Einheit: Vs/m² = Tesla (T)

μ_0 = Magnetische Feldkonstante

$4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am

Wird die Spule mit Materie ausgefüllt, dann ändert sich die magnetische Flussdichte B (bei gleichbleibender Feldstärke), sie wird entweder größer oder kleiner. Das Verhältnis bezeichnet man als Permeabilitätszahl μ_r

$$(3) \quad \vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \text{ bzw.}$$

$$(4) \quad \mu_r = \frac{|\vec{B}|}{|\vec{B}_0|}$$

B = Magnetische Flussdichte in Materie

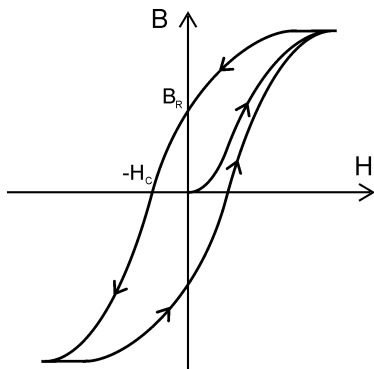
Ferromagnetismus

Im Gegensatz zu rein diamagnetischen Stoffen besitzen die Atome und Moleküle paramagnetischer Stoffe permanente magnetische Momente. Durch die thermische Bewegung sind diese nicht geordnet. Dies ändert sich wenn ein Magnetfeld angelegt wird, das die Momente der Atome ordnet und eine Magnetisierung hervorruft. Bei ausreichender Wechselwirkung zwischen den magnetischen Momenten lässt sich auch ohne äußeres Magnetfeld eine Ordnung erzwingen. Dies bedeutet eine Magnetisierung des Stoffes und man spricht von Ferromagnetismus.

Da die Wechselwirkung zwischen den Atomen eine wesentliche Rolle spielt, gibt es Ferromagnetismus nur bei festen Stoffen, nicht jedoch bei Flüssigkeiten oder Gasen.

Hysterese

Wird ein anfangs unmagnetischer Körper durch ein angelegtes Magnetfeld magnetisiert, dann beobachtet man bei zunehmender Feldstärke H eine steigende Flussdichte B im Material, wobei der Zusammenhang der beiden Größen nicht linear ist und bei ausreichend hohen Feldstärken in Sättigung gerät (Neukurve).



Lässt man nun die Feldstärke wieder abnehmen, dann läuft die Magnetisierung nicht mehr auf der Neukurve zurück. Stattdessen nimmt sie schwächer ab und es verbleibt bei $H=0$ (kein Spulenstrom) eine Magnetisierung bzw. ein remanentes Feld zurück, das man als

Remanenz B_R bezeichnet. Da kein Spulenstrom fließt, könnte man zu diesem Zeitpunkt den Kern ohne Magnetisierungsänderung entnehmen – er ist ein aufgrund seines ferromagnetischen Verhaltens unter dem Einfluß des äußeren Magnetfeldes ein Permanentmagnet geworden. Dieses Verhalten wird in vielen Medien zur Datenspeicherung verwendet. Je nach Anwendung lassen sich Materialien mit verschiedenen Hystereseigenschaften zum schnellen Schreiben und Lesen von Daten oder andererseits zur langfristigen Datenspeicherung (bleibende Magnetisierung) verwenden.

Erst nach Anlegen der **Koerzitivfeldstärke** $-H_c$ in Gegenrichtung zur ursprünglichen Erregung wird die Magnetisierung auf Null gebracht. Bei einer weiteren Erhöhung der magnetischen Feldstärke zu negativen Werten steigt nun die Magnetisierung wiederum bis zur Sättigung an, es ergibt sich eine zum Ursprung symmetrische Kurve, die zwei unterschiedliche Äste, je nach Richtung der Änderung der Magnetfeldstärke, aufweist. Dieses Verhalten wird als magnetische Hysterese bezeichnet.

Die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte von der Feldstärke lässt sich nicht durch eine Funktion beschreiben, da die Magnetisierung in komplizierter Weise von der Vorgeschichte des Materials abhängt (dieses Phänomen des „Gedächtnisses“ einer physikalischen Größe von der Vorgeschichte tritt nicht nur im Magnetismus auf und bezeichnet man allgemein als Hysterese). So ändert sich der Kurvenverlauf (zu geringeren Werten) wenn die Magnetisierung nicht bis zur Sättigung erhöht wird (was zur Entmagnetisierung mit einem Wechselfeld ausgenutzt wird – ein wichtiger Prozess beim Löschen magnetisch gespeicherter Daten).

Wegen der komplizierten Abhängigkeit lässt sich die Permeabilitätszahl μ_r nicht ohne weiteres angeben, da sie sich mit der angelegten Feldstärke ändert. So lässt sich zum Beispiel die Anfangspermeabilität (Steigung der Neukurve bei $H=0$) oder die Maximalpermeabilität (der maximale Wert während Aufnahme der Neukurve) angeben.

Luftspalt

Um die Flussdichte B in einem Ringkern direkt messen zu können, muss ein Luftspalt eingefügt werden. Dieser muss breit genug für die Messsonde sein. Im Vergleich zum geschlossenen Ringkern verlaufen nun die magne-

tischen Feldlinien aber teilweise in Luft, weshalb die Feldstärke (bei gleichem Strom) im geschlitzten Kern kleiner ist als im ungeschlitzten (s. Gleichung (1)). In diesem Fall müssen – da die Feldstärke entlang der Feldlinien nicht konstant ist – die magnetischen Spannungen V für jeden Teil addiert werden:

$$(5) \quad V = I \cdot N = H_E \cdot l_E + H_L \cdot l_L$$

H_E / l_E = Feldstärke bzw. Länge im Eisen

H_L / l_L = Feldstärke bzw. Länge des Luftspaltes

(H / l = Feldstärke bzw. Länge des intakten Ringkernes)

$$(6) \quad H_E = \frac{I \cdot N}{l_E} - \frac{H_L \cdot l_L}{l_E}$$

Für kleine Luftspalte (geringe Randeffekte) kann man näherungsweise annehmen, dass die magnetische Flussdichte im Luftspalt gleich jener im Eisen ist:

$$(7) \quad B = B_E \approx B_L = \mu_o \cdot H_L \text{ bzw.}$$

$$(8) \quad H_E = \frac{l}{l_E} \cdot \left(H - \frac{B_L \cdot l_L}{\mu_o \cdot l} \right)$$

Für kleine Luftspalte ist l näherungsweise gleich groß wie l_E , woraus folgt:

$$(9) \quad H_E = H - \frac{B_L \cdot n}{\mu_o}$$

n = Entmagnetisierungsfaktor (l_L / l_E)

Bei der Aufnahme von Hysteresekurven wird der Spulenstrom I als Maß für die Feldstärke verwendet. Gleichung (9) zeigt, dass die wahre Feldstärke geringer ist als angenommen, weshalb die gemessene Hysteresekurve flacher verläuft als es ohne Luftspalt der Fall wäre (man spricht von „Scherung“), wobei die Sättigungsflussdichte nicht verändert wird.

Um die tatsächliche Permeabilitätszahl des Ringkernes zu bestimmen, muß man daher die gemessene Magnetisierungskurve „zurückscheren“, also die Hysteresekurve um den Betrag nB/μ_o verschieben. Damit lassen sich

die tatsächliche Remanenz und Permeabilitätszahl ermitteln.

Multipliziert man Gleichung (9) mit μ_0/B , dann erhält man direkt eine Beziehung zwischen der aus der Messung ermittelten Permeabilitätszahl $\mu_{\text{exp}} = B / \mu_0 H$ und dem tatsächlichen Wert $\mu_r = B / \mu_0 H_E$:

$$(10) \quad \frac{1}{\mu_r} = \frac{1}{\mu_{\text{exp}}} - n$$

Hall-Effekt

Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld (normal zur Stromrichtung), dann bewirkt die Lorentz Kraft eine Ablenkung der Ladungen und damit eine Ladungstrennung. Die sich aus diesem Hall-Effekt ergebende Hall-Spannung fällt normal zur Stromfluss- und Magnetfeldrichtung ab.

Dieser Effekt lässt sich in sogenannten Hallsonden zur Messung von Magnetfelder ausnützen, da (bei konstantem Stromfluss) die erzeugte Hall-Spannung von der magnetischen Flussdichte B abhängt. Man kann somit mit sehr kleinen Hall-Elementen Magnetfelder lokal vermessen und aus der induzierten Hall-Spannung die magnetische Flussdichte (und ihre räumliche Verteilung) bestimmen. Die Kalibrierung erfolgt dabei über Magnete mit bekannten Flussdichten (\rightarrow Kalibrierungskurven).

Apparatur und Geräte

Ringspulen mit verschiedenen Kernen bzw. Luftspalten und Hallsonden.

Netzgeräte für Ringspulen und Hallsonden. Entmagnetisierungsgerät. Verschiedene Multimeter.

Versuchsdurchführung und Auswertung

Wichtige Hinweise

1) **Die Hallsonden sind äußerst fragil und mit größter Sorgfalt zu behandeln!** Da es sich dabei um Spezialanfertigungen handelt, sind diese nur mit großem Aufwand zu ersetzen und damit sehr teuer. Insbesondere bei der Messung innerhalb des Luftspaltes sind diese **sehr vorsichtig zu bewegen um keine Verbiegungen zu verursachen**, die zum Brechen des Materials führen können.

2) Um die Ringkerne nicht zu überhitzen dürfen langfristig **keine hohen Stromstärken** angelegt werden (die Grenzwerte sind an den Geräten angegeben und streng einzuhalten). Daher sind hohe Ströme **generell so kurz wie möglich** zu verwenden und der Strom ist nach der Beendigung einer Versuchsreihe sofort auf Null zu reduzieren.

3) Zu Beginn jedes Experiments ist zu überprüfen, dass der Kern unmagnetisiert ist. Ebenso ist am Ende jedes Experiments der Kern der gemessenen Ringspule (mit vorhandenem Gerät) zu entmagnetisieren.

Zu Aufgabe 1

Mit Hilfe der Hallsonde ist die magnetische Flussdichte im Zentrum des Luftspaltes der Ringspule zu messen. Dabei ist die angelegte magnetische Feldstärke von Null beginnend schrittweise zu erhöhen (der Strom ist mit einem Multimeter zu messen). Nach Erreichen der Sättigung bzw. Aufnahme der Neukurve soll ein gesamter Zyklus vermessen werden.

Die Ergebnisse sind graphisch darzustellen und die wichtigen Kenngrößen (Sättigungsflussdichte, Remanenz, Koerzitivfeldstärke) sind daraus zu bestimmen, wobei der Bereich um die y-Achse für eine exakte Ableseung der Größen zusätzlich vergrößert darzustellen ist.

Die Permeabilitätszahl des Materials ist auf zwei Arten (durch Scherung und rechnerisch) zu bestimmen.

Zu Aufgabe 2

Die Vergrößerung des Luftspaltes führt zu oben beschriebener Veränderung der gemessenen Hysterese-kurve. Neukurve und ein kompletter Zyklus der Hysterese-kurve sind zu messen und graphisch darzustellen. Bestimmen Sie (wie in Aufgabe 1) die charakteristischen Größen und vergleichen Sie die für verschiedene Luftspalten gemessenen Werte.

Zu Aufgabe 3

Da das Hystereseverhalten vom Material abhängt, führt die Verwendung von Ferrit (an Stelle von Stahl) zu einer veränderten Kurvenform. Neukurve und Hysterese-kurve sind aufzunehmen und graphisch darzustellen und die wichtigen Kenngrößen sind zu bestimmen. Diskutieren Sie die Ergebnisse im Vergleich zum Stahl Ringkern und in Hinblick auf möglichen Anwendungen der Materialien.

Zu Aufgabe 4

Mit der Hallsonde lässt sich sowohl die räumliche Verteilung eines Magnetfeldes als auch die Richtung der Feldlinien bestimmen. Die Abhängigkeit der gemessenen Flussdichte von der Position der Hallsonde im Bereich des Luftspaltes ist zu bestimmen (verwenden Sie dafür den Ringkern mit dem größten Luftspalt). Die Verteilung der Flussdichte im Luftspalt ist anschaulich darzustellen und der Verlauf der magnetischen Feldlinien im und in der Nähe des Luftspaltes ist zu skizzieren.

Mögliche Ursachen einer eventuellen Inhomogenität sind zu diskutieren. Welche Erkenntnisse ergeben sich daraus für die Genauigkeit der zuvor durchgeführten Messungen?

Gehen Sie in der abschließenden Diskussion auf mögliche Gründe für Abweichungen und Ungenauigkeiten der in Aufgaben 1-3 experimentell bestimmten Permeabilitätszahl ein.