



Physikalisches Praktikum II

Bachelor Physikalische Technik: Lasertechnik
Prof. Dr. H.-Ch. Mertins, MSc. M. Gilbert

FK04 Ferromagnetismus & magnetische Werkstoffe

(Pr_PhII_FK04_Magnetismus_7, 24.10.2015)

Name	Matr. Nr.	Gruppe	Team
1.			
2.			
Protokoll ist ok	O	Datum	Abtestat
Folgende Korrekturen nötig	O		

Hinweis

Lesen Sie die Versuchsanleitung (inkl. Versuchsdurchführung & Auswertung!) gründlich durch und machen sich mit den Begrifflichkeiten vertraut. Die Teilnahme am Praktikum erfordert das erfolgreiche Beantworten der Zulassungsfragen am Versuchstag (siehe Anleitung) oder alternativ eine kurze Vorstellung eines Themengebietes an der Tafel.

1. Ziel

Ein zentrales Arbeitsfeld in der Physik ist z.Z die Untersuchung des Magnetismus auf atomarer Ebene mit dem Ziel kleinste magnetische Speicher mit höchster Dichte zu entwickeln. Wie klein darf z.B. die magnetische Domäne werden, auf der noch ein bit geschrieben werden kann? Auch für die Lasertechnik ist das Verständnis von Magnetismus in Festkörpern von Bedeutung: Magnetische Übergänge können in einem laseraktiven Medium die Aussendung von Licht beeinflussen und für den Laserprozess nutzbar gemacht werden.

In diesem Praktikum werden durch die Untersuchung des Ferromagnetismus die Grundlagen für das Verständnis des Magnetismus gelegt.

2. Theorie**2.1 Felder**

Magnetfelder werden von stromdurchflossenen Leiter oder durch Permanentmagnete erzeugt. Sie üben Kräfte auf die Pole von Permanentmagneten aus, ebenso wie auf stromdurchflossene Leiter (Lorentzkraft, Elektromotor). Magnetische Feldlinien sind stets geschlossen, haben also weder Anfang noch Ende. Sie werden durch die magnetische Feldstärke H beschrieben. Im einfachen Fall einer stromdurchflossene Spule der Länge L mit N Windungen und Strom I gilt im Inneren der Spule

$$(1) \quad H = \frac{NI}{L}, \quad [H] = \frac{A}{m}$$

In den meisten Fällen arbeitet man nicht mit dem H-Feld, sondern mit der magnetischen Flussdichte B . Sie berücksichtigt den Einfluss der Materie und wird zur Berechnung der Lorentzkraft und der Induktion benutzt. Es gilt

$$(2) \quad B = \mu_0 \mu H, \quad [B] = \frac{Vs}{m^2} = T = Tesla$$

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \text{ Permeabilitätskonstante}$$

$$\mu \text{ Permeabilitätszahl, materialspezifisch, ohne Einheit}$$

Die Dichte der B-Feldlinien ist ein Maß für die Magnetfeldstärke. Für die Berechnung der Induktion (s.u.) benötigen wir eine weitere Größe, den magnetischen Fluss Φ . Er gibt die Zahl der B-Feldlinien an, die senkrecht durch eine Fläche A laufen und wird berechnet durch das Flächenintegral $\oint \vec{B} \cdot d\vec{A}$. Treten die Feldlinien eines *homogenen* Feldes senkrecht durch die Fläche A , so vereinfacht sich das Integral zu:

$$(3) \quad \Phi = BA, \quad [\Phi] = Vs = Wb = Weber$$

2.2 Magnetismus in Materie

Bringt man Materie in ein äußeres Magnetfeld H , so wird dieses verändert. Es erzeugt in der Materie ein zusätzliches inneres Feld, beschrieben durch die Magnetisierung M . Beide ergeben das gesamte Feld

$$(4) \quad B = \mu_0 H + M$$

$$B = \mu_0 (1 + \kappa) H, \quad \mu = 1 + \kappa$$

Die Reaktion der Materie auf das äußere Magnetfeld kann also wahlweise durch M , oder durch eine der einheitslosen Konstanten μ oder κ (Suszeptibilität) beschrieben werden. Für Vakuum und näherungsweise auch für Luft gilt $M = 0$, $\mu = 1$ und $\kappa = 0$. Die Magnetisierung $M = \kappa H$ ist bei *kleinen* Feldern proportional zu H mit der Suszeptibilität κ als materialabhängige Proportionalitätskonstante. Anhand der Größe κ können 3 Typen von Materialien hinsichtlich ihrer Reaktion auf das Magnetfeld unterschieden werden:

- Diamagnet $\kappa \approx -10^{-6}$, Diamagnet wird aus B-Feld hinausgedrückt da $\kappa < 0$
- Paramagnet $\kappa \approx +10^{-6}$, Paramagnet wird in B-Feld hineingezogen da $\kappa > 0$
- Ferromagnet $\kappa \approx +1000$, Ferromagnet wird in B-Feld hineingezogen

Die Magnetisierung M wird durch die teilweise Ausrichtung der magnetischen Dipolmomente der Atome im äußeren H -Feld verursacht. Ohne äußeres Feld führt die thermische Bewegung zu einer statistischen Verteilung der Dipolmomente, d.h. zu unmagnetisierter Materie mit $M = 0$. Die magnetischen Dipolmomente selbst werden durch den Spin und durch den Bahndrehimpuls der Elektronen eines jeden Atoms gebildet, worauf hier aber nicht näher eingegangen werden kann.

2.3 Ferromagnetismus

Während Dia- und Paramagneten nur magnetisiert sind, solange sie sich im äußeren Magnetfeld H befinden, behält ein Ferromagnet seine Magnetisierung M bei. Diese hängt stark von der „Vorgeschichte“ ab. Sie wächst nicht linear mit H , denn κ selbst hängt empfindlich von H ab. Das Verhalten der Magnetisierung $M(H)$ wird durch die Hysterese Kurve erfasst, wobei folgende 4 Größen wichtig sind:

- Neukurve: Magnetisierung des unmagnetisierten Materials
- Sättigung: M ist maximal, \rightarrow Dipolmomente sind ausgerichtet
- Remanenz M_r : Restmagnetisierung bei $H = 0$
- Koerzitivfeld H_C : Gegenfeld zur Kompensation von M

Beachte, dass κ selbst keine Konstante ist, sondern von H abhängt. Sie ist die Steigung der Kurve $M(H)$. In Tabellen findet man daher κ -Werte für $H = 0$

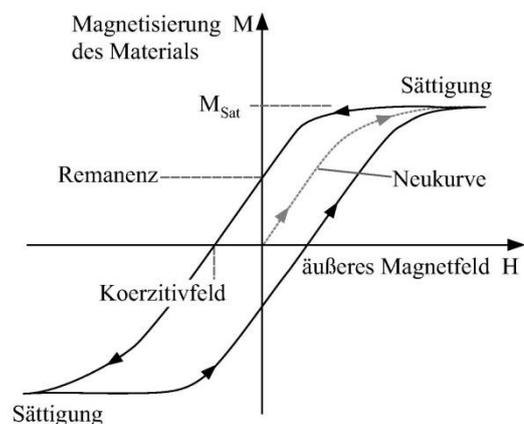


Abb. 1 Hysterese Kurve eines Ferromagneten

oder für bestimmte Punkte der Hysterese Kurve. Oft wird die Hysterese Kurve nicht durch $M(H)$ sondern gleichwertig durch $B(H) = \mu_0 H + M(H)$ dargestellt. Bei Raumtemperatur (300 K) sind neben Eisen noch die Elemente Co, Ni, Sm und Legierungen dieser Materialien ferromagnetisch.

Aus der Hysterese Kurve kann man die für die Ummagnetisierung des Materials nötige Energie E pro Materialvolumen V bestimmen.

Sie ergibt sich aus der von der Hysterese Kurve eingeschlossenen Fläche:

$$(5) \quad \frac{E}{V} = \oint B dH$$

Sie ist eine wichtige Größe zur Optimierung von Wechselstromtransformatoren, denn hier wird typischerweise 50-mal pro Sekunde (Netzfrequenz) ummagnetisiert, wobei jedes Mal elektrische Energie in Verlustwärme umgewandelt wird. Idealerweise zeigt daher der magnetfeldführende Kern eines Transformators eine Hysterese Kurve mit verschwindender Fläche. Damit bleibt der Energieverlust bei jedem Ummagnetisierungsvorgang klein. Geeignet sind Weicheisenmaterialien mit kleinem H_C und M_r . Diese werden auch für Elektromagnete genutzt, denn hier soll die Remanenz verschwinden, wenn der Strom ausgeschaltet wird. Permanentmagnete müssen dagegen eine große Remanenz M_r aufweisen.

2.4 Statische Messung des Magnetfeldes im Luftspalt

Die magnetische Flussdichte B einer stromdurchflossenen Spule kann durch einen ferromagnetischen Kern deutlich erhöht werden (Gl. 1, 2). Besonders groß ist B , wenn der Kern einen geschlossenen Ring bildet, denn somit wird der magnetische Fluss Φ (Gl.3) vollständig geführt. Für viele technische

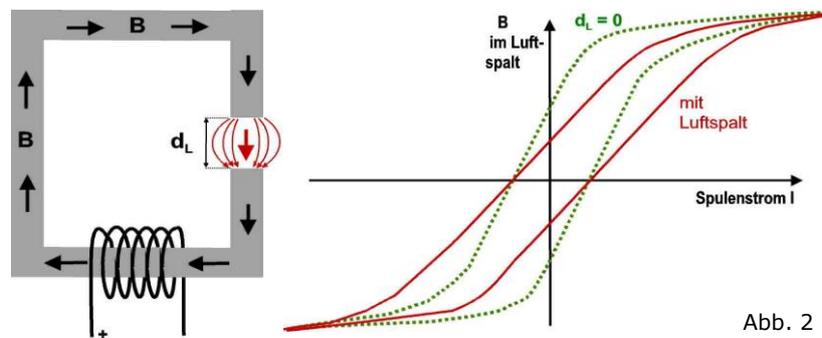


Abb. 2

Anwendungen muss es aber einen Luftspalt der Breite d_L im Ring geben, was das magnetische Verhalten erheblich ändert: die Feldlinien werden „herausgedrängt“ und die Flussdichte B verringert sich im Luftspalt. Die Magnetisierung erreicht erst bei viel höheren Strömen die Sättigung, d.h. die Hysterese Kurve wird geschert. Ist der Luftspalt d_L klein gegenüber der Kernlänge, so berechnet sich die Flussdichte B im Luftspalt näherungsweise durch

$$(7) \quad B \approx \mu_0 \frac{N I}{d_L}$$

Zur Messung von Magnetisierungskurven der Materialien nutzen wir im Praktikum 2 Methoden. Hat man den obigen Fall eines Kerns mit Luftspalt, so wird ein Hallsensor (siehe Praktikum Halleffekt) im

Luftspalt platziert. Bei geschlossenen Kernen wird die elektromagnetische Induktion bei Wechselströmen ausgenutzt und eine dynamische Messung durchgeführt.

2.5 Dynamische Messung

Hier wird die Induktion ausgenutzt um die Magnetisierung eines geschlossenen Eisenkerns mit der Querschnittsfläche A zu messen. Dieser führt den magnetischen Fluss Φ von der Primärspule, die durch einen Wechselstrom I_P betrieben wird, durch die Sekundärspule mit Windungszahl N_S , wo die Spannung U_i induziert wird. Die Messung erfolgt mit dem Oszilloskop. An der x -Achse liegt der Primärstrom I_P an, der proportional zum H-Feld ist. Um die Hysterese Kurve $B(H)$ zu erhalten, muss an der y -Achse ein Signal aufgetragen werden, das proportional zur Flussdichte B ist. Dazu wird die Induktionsspannung U_i der Sekundärspule durch geeignete Wahl von Widerstand R und Kondensator C integriert. Hierzu schreiben wir das Induktionsgesetz $U_i = -N d\Phi/dt$ in integraler Form

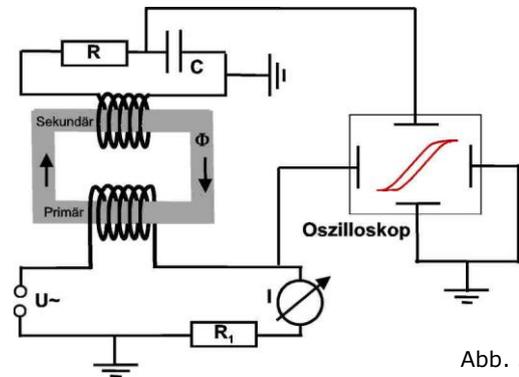


Abb. 3

$$(8) \quad \int_{t_1}^{t_2} U_i dt = -N_S A \int dB$$

Der daraus resultierende Induktionsstrom $I = U_i / R$ führt zu einer Änderung der Kondensatorspannung ΔU_C .

$$(9) \quad \Delta U_C = \int_{U_{C1}}^{U_{C2}} dU_C = \frac{Q_2}{C} - \frac{Q_1}{C} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Idt}{C} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} U_i dt}{RC}$$

Unter Annahme einer kleinen Integrationszeit ($t_2 - t_1$) gegenüber der Zeitkonstanten $\tau = RC$ der Schaltung kann man von den Differenzen ΔU_C zu den Absolutwerten U_C gehen. Aus dem Induktionsgesetz (Gl. 8) wird die am Kondensator abfallende Spannung U_C berechnet

$$(10) \quad U_C = -\frac{N_S A}{RC} B$$

Diese wird als Messwert an der y -Achse des Oszilloskops angelegt (Abb. 3). Auf der x -Achse wird das H-Feld, d.h. nach Gl. 1 der Spulenstrom, bzw. die eingestellte Spulenspannung angetragen.

Fragen Zulassung

- Wie kann man Magnetfelder erzeugen?
- Welche Bedeutung haben die Größen: $H, B, \Phi, M, \mu, \kappa$?
- Wie kann man Magnetfelder messen?
- Zeichnen Sie die Magnetisierungskurven eines Ferromagneten $M(H)$ bzw. $B(H)$ (Hysterese Kurve) und kennzeichnen Sie Remanenz, Koerzitivfeld, Sättigung.
- Worin unterscheiden sich Ferromagnete von Para- und Diamagneten?

3. Durchführung

Magnetfeld im Luftspalt

Sie arbeiten mit der Spule deren Magnetfeld durch einen U-förmigen Eisenkern geführt wird. Mit einer kommerziellen Hallsonde messen Sie B im Luftspalt des Kerns.

- 3.1 Notieren Sie den Nullabgleich der Hallsonde für $B = 0$. Notieren Sie Windungszahl und Länge der Spule. Bestromen Sie die Spule mit $0,5A$ und ermitteln Sie die empfindliche Stelle, d.h. die optimale Position der Hallsonde für die Feldmessung.
- 3.2 Platzieren Sie die Hallsonde zentral im Luftspalt. Starten Sie zur Messung der Hysterese Kurve beim maximal zulässigen (pos.) Stromwert von $1,4 A$ (für 10 Sekunden). In $0,2A$ -Schritten wird der Strom reduziert und die Daten der Hallsonde aufgenommen. Bei $0A$ wird der Strom umgepolt und die Messreihe in negativer Richtung fortgesetzt bis zum maximal zulässigen neg. Stromwert $-1.4 A$. Dann wird der Strombetrag wieder in $0,2 A$ Schritten reduziert und der untere Zweig der Kurve aufgenommen bis zum max. pos. Stromwert $+1,4 A$ (bei $0A$ umpolen).

WICHTIG: Strom nur monoton ändern! Bei Stromabschaltung neue Messung nötig!

- 3.3 Zur Messung der Neukurve muss der Spulenkern erst entmagnetisiert werden. Regeln Sie dazu den Strom von positiven zu negativen Werten, die mit jedem Zyklus betragsmäßig kleiner werden und gegen Null laufen, bis die Hallsonde $U = 0$ anzeigt.

Fahren Sie den Spulenstrom in $0,1A$ -Schritten von 0 bis zum Maximalwert $1,4 A$ und messen Sie das Signal der Hallsonde.

- 3.4 Messen Sie die Feldstärke $B(x)$ als Funktion des horizontalen Abstandes vom Zentrum des Luftspaltes quer zur Verbindungslinie zwischen den Polen in $2mm$ Schritten.

Hysterese Kurve: Dynamische Messung:

Es sollen die Hysterese Kurve verschiedener Materialien aufgenommen und die Ummagnetisierungs-Verlustleistung bestimmt werden.

- 3.5 Machen Sie sich mit der Schaltung (Abb. 3) vertraut und notieren Sie die Daten der verwendeten Bauteile: Windungszahl N_p , N_s , Spulenquerschnitt A , Kapazität C , Widerstand R , Frequenz f , Spannung U_c , Kernmaterial, Querschnittsfläche des Spulenkerns, Länge L_{Fe} des Spulenkerns.
- 3.7 Nehmen Sie die Hysterese Kurven für 3 verschiedene Metalle/Metallegierungen auf. Notieren Sie jeweils die Skalierungen der Achsen auf dem Oszilloskop und speichern (exportieren) Sie die Messung bzw. das Bild.

Messen Sie jeweils den Magnetisierungs-Wechselstrom bzw. die anliegende Wechselspannung, um später die Achsen kalibrieren zu können! (Betreuer fragen).

Kalibrieren Sie die x-Achse: $H_{\max} = N_p I_{eff} \sqrt{2} / L_{Fe}$

y-Achse: $B_{\max} = U_c RC / (N_s A)$

Skalieren Sie die x-Achse in Einheiten des H-Feldes und die y-Achse in Einheiten des B-Feldes.

4 Auswertung

- 4.1 Stellen Sie die in 3.2 und 3.3 gemessenen Hysterese kurven $B(H)$ in einem Diagramm dar. Kennzeichnen Sie Remanenz, Koerzitivwerte. Berechnen Sie $M_{\text{Sättigung}}$ (Gl. 4). Machen Sie hierzu die Fehlerrechnung.
- 4.2 Nennen Sie den sinnvollen Arbeitsbereich (linearer Bereich $B(I)$) dieses Elektromagneten.
- 4.3 Tragen Sie $B(x)$ als Funktion des Abstandes x von der Verbindungslinie der Polschuhe auf (Daten aus 3.4). Machen Sie qualitativ Angaben zur Homogenität des B-feldes und kennzeichnen Sie den Arbeitsbereich, für den das B-Feld höchstens um 10% vom Maximalwert im Zentrum abweicht.
- 4.4 Stellen Sie die Hysterese Kurve der in 3.6 vermessenen Materialien dar und skalieren Sie die x-Achse in Einheiten von H und die y-Achse in Einheiten von B. Bestimmen Sie Remanenz, Koerzitivwert und $M_{\text{Sättigung}}$.
- 4.5 Welche Materialien eignen sich besonders als: a) Permanentmagnet, b) als Spulenkern im Transformator, c) als Antennenmaterial für Hochfrequenzwellen?