

310 - Ferrograph

1. Aufgaben

- 1.1 Die Magnetisierungskurven sowie die Neukurven zweier ferromagnetischer Werkstoffe sind mit dem Ferrographen aufzunehmen.
- 1.2 Die Koerzitivfeldstärke und die Remanenzinduktion der Proben sowie die relative Permeabilität für verschiedene Magnetisierungsbereiche der Neukurve sind zu berechnen.

2. Grundlagen

Stichworte:

Magnetismus, Magnetisierung, Weißsche Bezirke, Hysterese, Oszilloskop, RC-Glied

2.1 Magnetismus

Wird ein Stoff einem **magnetischen Feld** H ausgesetzt, so wird er magnetisiert. Die resultierende **magnetische Induktion** B setzt sich aus der magnetischen Feldstärke H und der Magnetisierung M der Probe, die bei vielen Materialien der magnetisierenden Feldstärke proportional ist, in folgendermaßen zusammen:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (H + \chi_m H) = \mu_0 \mu_r H \quad \text{mit} \quad \mu_r = (1 + \chi_m).$$

Hierbei ist $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ die Induktionskonstante. Die relative Permeabilität (Permeabilitätszahl) μ_r bzw. die magnetische Suszeptibilität χ_m charakterisieren die Stoffe hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften:

$\mu_r \leq 1$, d.h. $\chi_m \leq 0$ für Diamagnetika (z.B. Wasser)

$\mu_r \geq 1$, d.h. $\chi_m \geq 0$ für Paramagnetika (z.B. Co Cl_2 u.a. Salze)

$\mu_r \gg 1$ für Ferromagnetika (s. Tabelle).

Für ferromagnetische Stoffe hängt die relative Permeabilität von der magnetischen Feldstärke ab; es ergibt sich die in Bild 1 dargestellte Abhängigkeit der magnetischen Induktion B von der magnetischen Feldstärke H .

Die magnetische Induktion nimmt zunächst mit wachsender magnetischer Feldstärke zu (Kurve 1) und erreicht dann für $H = H_S$ einen Sättigungswert B_S . Dieser Kurvenzug wird als Neukurve bezeichnet. Wird die magnetische Feldstärke von H_S aus verringert, so nimmt die magnetische Induktion wieder ab (Kurve 2), wobei jedoch für $H = 0$ der Stoff einen Restmagnetismus aufweist, der durch die Remanenzinduktion B_R charakterisiert ist. Erst durch eine Koerzitivfeldstärke $H = -H_C$ wird diese Remanenz beseitigt (Kurve 3). Bei einer zyklischen Veränderung der magnetischen Feldstärke wird die Hysterese wiederholt durchlaufen.

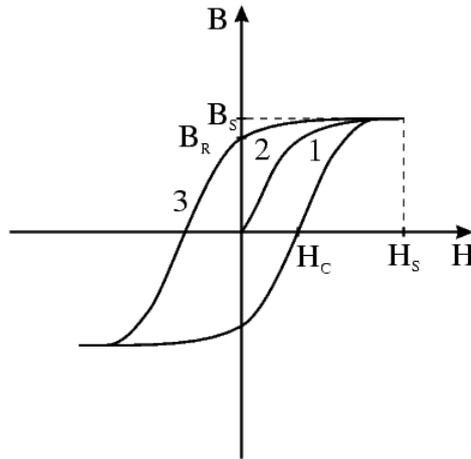


Bild 1: Hystereseschleife eines Ferromagneten. B_S ... Sättigungsinduktion, B_R ... Remanenzinduktion, H_C ... Koerzitivfeldstärke, H_S ... Sättigungsfeldstärke.

Tabelle 1: Ferromagnetische Werkstoffe

	hartmagnetische Werkstoffe	weichmagnetische Werkstoffe
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> - starker Dauermagnetismus - schwer magnetisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - schwacher Dauermagnetismus - leicht magnetisierbar
Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> - Stahl $H_C = 3500 - 4800 \text{ A/m}$ $B_R = 0,6 \text{ T}$ - hartmagnetische Legierungen (65% Fe, 15% Al, 20% Ni) $H_C = 4 \cdot 10^4 - 7 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ $B_R = 0,6 - 0,7 \text{ T}$ - keramische Werkstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> - reines Eisen $H_C = 2 \text{ A/m}$ - Fe - Si - Blech $H_C = 20-100 \text{ A/m}$ - keramische Werkstoffe
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> - Dauermagnete - Lautsprecher - Fahrraddynamo - Kleinstmotoren - elektrische Messgeräte 	<ul style="list-style-type: none"> - Transformatoren - Ferrit - Antennenstäbe - Spulenkern für Hochfrequenz - und Fernmeldetechnik

Vergleich: Erdmagnetfeld: $H \approx 50 \text{ A/m}$, $B \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.

2.2 Wirkungsweise des Ferrographen

Der Ferrograph wird mit Hilfe der Schaltung in Bild 2 realisiert.

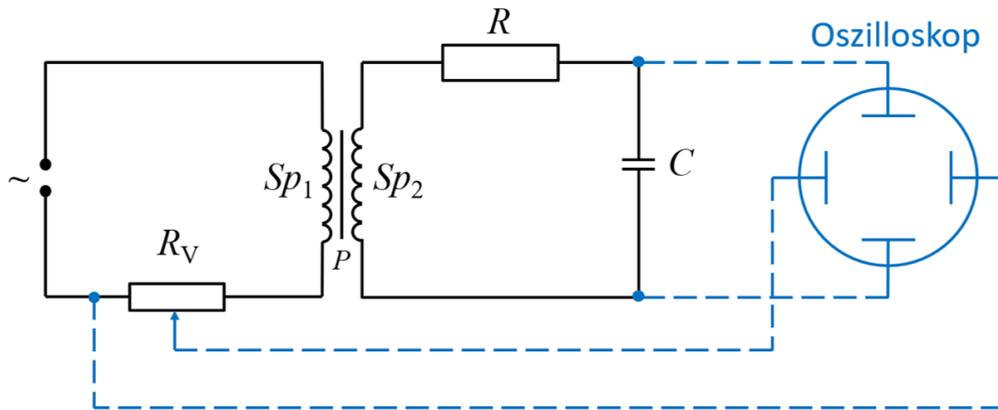


Bild 2: Schaltung des Ferrographen: Sp_1 und Sp_2 ... Spulen, R_V ... Vorwiderstand.

Im magnetischen Wechselfeld einer Spule Sp_1 (Windungszahl N_1 , Länge l) wird die zu untersuchende ferromagnetische Probe P (hier das Kernmaterial der Spule) ständig ummagnetisiert. Die momentane Magnetfeldstärke in der Spule ist dabei durch

$$H = \frac{N_1 I}{l} \quad (1)$$

gegeben. Die dazu notwendige Spannung wird durch einen Trennstelltrafo (230V, 50Hz) mit nach geschaltetem Zusatztransformator (für niedrige Spannungswerte) erzeugt. Bei einer vorgegebenen Spannung U und bei Vernachlässigung des induktiven Widerstandes der Spule Sp_1 wird die Stromstärke I durch die Größe des Vorwiderstandes R_V entsprechend

$$I = \frac{U}{R_V} \quad (2)$$

bestimmt. Aus (1) und (2) ergibt sich

$$H = \frac{N_1}{l R_V} \cdot U \quad (3),$$

d.h. die Magnetfeldstärke H ist dem Spannungsabfall U am Widerstand R_V proportional. Der Spannungsabfall U wird deshalb an die horizontalen Ablenkplatten des Oszilloskops gelegt und ist ein Maß für die magnetische Feldstärke.

Der magnetische Fluss $\Phi = BA$ (A : Probenfläche = Spulenfläche) der Probe P durchsetzt die Spule Sp_2 (Windungszahl N_2). In dieser wird eine Spannung gemäß

$$U_{\text{ind}} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

induziert.

Die Spannung U_{ind} liefert die zeitliche Ableitung der magnetischen Induktion B . Um B selbst zu erhalten, benutzen wir ein RC -Glied zur zeitlichen Integration. Die Spannung U_{ind} führt bei Vernachlässigung des kapazitiven Widerstandes des Kondensators ($R \gg 1/\omega C$ im RC -Glied) zu der Stromstärke $I_2 = U_{\text{ind}}/R$. Für den Betrag der am Kondensator abfallenden Spannung U_C gilt dann (siehe Literatur [1]):

$$U_C = \frac{1}{C} \int I_2 \, dt = \frac{1}{RC} \int U_{\text{ind}} \, dt \quad (5).$$

Mit (4) ergibt sich aus (5)

$$U_C = \frac{1}{RC} \int N_2 A \frac{dB}{dt} dt = \frac{N_2 AB}{RC} \quad (6).$$

Folglich ist der Spannungsabfall U_C am Kondensator der magnetischen Induktion B proportional und wird als Messspannung an die vertikalen Platten des Oszilloskops gelegt.

3. Versuchsdurchführung

- 3.1 Bauen Sie den Ferrograph (Schaltung, Bild 2) auf! Hinweise zur Bedienung des Oszilloskops finden Sie im Anhang bzw. am Versuchsplatz. Die zu untersuchenden Proben sind: ein Kleintransformator mit einem Kern aus Eisenblech und eine Ferritkernspule.

Legen Sie das Signal von R_V an den Eingang 1, das Signal vom RC -Glied an den Eingang 2 und schalten Sie den Oszi auf XY-Betrieb! Die Hysterese wird durch geeignete Einstellung von R_V (100 Ω) und Versorgungsspannung (max. 100 V) in die Sättigung gefahren (vgl. Bild 1). Mit Hilfe der X- und Y-Verstärkung wird ein formatfüllendes Bild erzeugt und auf einem USB-Stick zum späteren Ausdrucken gespeichert.

Zur Messung der Achsenschnittpunkte (U_X , U_Y), aus denen H_C und B_R berechnet wird, kann man das Bild weiter vergrößern und Cursors benutzen.

Nehmen Sie auch die Neukurve auf (das ist der Weg, den die Spitze der Hysterese bei schrittweiser Erhöhung der Spannung am Stelltrafo zurücklegt), und zeichnen Sie diese nachträglich mit in das H - B -Diagramm ein!

Es wird empfohlen, zuerst den Trafo und anschließend die Ferritkernspule zu vermessen.

- 3.2 Berechnen Sie Koerzitivfeldstärke und Remanenzinduktion beider Proben! Die technischen Daten der verwendeten Spulen und Bauelemente liegen am Versuchsplatz aus.

Ermitteln Sie aus den Neukurven die Permeabilitätswerte μ_r für die verschiedenen Magnetisierungsbereiche und stellen Sie μ_r in Abhängigkeit von H grafisch dar!

- 3.3 (Zusatzaufgabe) Überprüfen Sie für das bereitgestellte RC -Glied, ob $R \gg 1/\omega C$ erfüllt ist, und erklären Sie die Schleifen am Ende der Hysteresekurven! Testen Sie dazu auch andere RC -Kombinationen!

Untersuchen Sie den Einfluss von R_V auf die Form der Hysterese!

Anhang

Ausführliche Erläuterungen zur Funktion und Bedienung eines Oszilloskops finden Sie in der Anleitung zum Versuch 330. Allerdings bezieht sich die Beschreibung dort auf analoge Geräte. Wir verwenden in unserem Experiment einen Digital-Oszi, der im Prinzip genauso arbeitet, aber einige zusätzliche Funktionen hat.

Im Normalbetrieb werden periodische Signale an die Eingänge „1“ und/oder „2“ angelegt und ihre zeitlichen Verläufe einzeln oder auch gleichzeitig am Bildschirm dargestellt. Die x-Achse zeigt dann die Zeit (in s, ms, μ s), die y-Achse die Amplitude (Spannung in V). Über Positionsregler können die Signale nach rechts/links bzw. oben/unten verschoben werden, mit Hilfe der X- und Y-Verstärkung werden sie gestaucht oder gestreckt.

Im XY-Betrieb (Tasten: Acquire, Time Mode, XY) wird das Signal von Eingang 1 auf X, das von Eingang 2 auf Y gelegt. Im Zusammenspiel ergibt sich bei reinen Sinus-Signalen eine sogenannte „Lissajous-Figur“ (z.B. eine Ellipse, vgl. Versuch 330). In unserem Experiment sehen wir eine Hysterese. Mit Hilfe der Positions- und Verstärkungsregler lässt sich diese in eine geeignete Form und Größe bringen. Die Achsenschnittpunkte können mit Cursors (X1, X2, Y1 und Y2) vermessen werden (Taste Cursors + Regler rechts daneben). Die jeweiligen Messwerte einschließlich der Differenzen (ΔX , ΔY) erscheinen direkt auf dem Bildschirm. Über einen USB-Ausgang kann man die Bilder bzw. Daten abspeichern.