

## Versuchsanleitung E 4 : Magnetische Hysterese

### 1 Einleitung

Wird ein Stoff einem Magnetfeld ausgesetzt, so finden Wechselwirkungen zwischen dem Feld und den magnetischen Momenten der Elektronenhüllen der Atome und Moleküle statt. Der Stoff wird durch das Feld magnetisiert, das Feld seinerseits durch die Magnetisierung verändert.

Nach ihrem unterschiedlichen Verhalten im Magnetfeld unterscheidet man diamagnetische, paramagnetische und ferromagnetische Stoffe. Die letztgenannten zeichnen sich dadurch aus, dass sie besonders stark magnetisiert werden können. Sie finden deshalb als magnetische Werkstoffe Verwendung. Man denke diesbezüglich an Elektromotoren, Schaltschütze, Relais, Transformatoren, elektrodynamische Messwerke, magnetische Speicher u. a. m. .

An magnetische Werkstoffe werden je nach Verwendungszweck sehr unterschiedliche Anforderungen gestellt. Zur Herstellung von Permanentmagneten verwendet man sogenannte hartmagnetische Werkstoffe mit großer Remanenz und hoher Koerzitivfeldstärke. Dynamobleche bestehen aus verlustarmen weichmagnetischen Stoffen mit schmalen Hystereseschleifen und großer Permeabilität.

Der vorliegende Versuch bietet die Möglichkeit, die Hystereseschleifen und Kommutierungskurven magnetischer Werkstoffe aufzunehmen und daraus magnetische Stoffkenngrößen zu bestimmen.

### 2 Grundlagen

Die Elektronen der Atomhüllen stellen bewegte Ladungen dar (Bahnbewegung, Spin). Als bewegte Ladungen besitzen sie magnetische Momente. Diese magnetischen Momente überlagern sich in einer vom Atombau (und ggf. der chemischen Bindung) abhängigen Weise zum resultierenden magnetischen Moment des Atoms (bzw. Moleküls), dem sogenannten permanenten atomaren (bzw. molekularen) Dipolmoment.

Die permanenten Dipolmomente sind bei diamagnetischen Stoffen Null, bei paramagnetischen Stoffen von Null verschieden. Trotzdem findet man bei paramagnetischen Körpern keinen Permanentmagnetismus, weil die Wärmebewegung die atomaren Dipole im Körper ohne Vorzugsrichtung verteilt.

Ferromagnetische Stoffe (z. B. Eisen, Kobalt, Nickel und bestimmte Legierungen) verhalten sich als Festkörper oberhalb einer für den jeweiligen Stoff charakteristischen Temperatur (CURIE-Temperatur  $T_C$ , nach PIERRE CURIE, 1859-1906) paramagnetisch. Ferromagnetismus wird erst beobachtet, wenn für  $T < T_C$  die atomaren Dipole in den Festkörperkristallen geordnet vorliegen. Innerhalb größerer Bereiche (ca.  $10^{-5}$  m), der sogenannten WEISS'schen Bezirke (nach PIERRE ERNEST WEISS, 1865-1940), findet man jeweils parallel angeordnete atomare Dipole und somit ein großes Dipolmoment. Aber auch die Dipolmomente der WEISS'schen Bezirke sind im Festkörpervolumen zunächst ungeordnet verteilt, ein magnetisch unvorbehandeltes Eisenstück zeigt keinen Permanentmagnetismus.

Beim Anlegen eines Feldes erfahren die atomaren Dipolmomente der Paramagnetika Drehmomente. Diese Drehmomente bewirken eine Richtungsverteilung der Dipole, bei der die Feldrichtung bevorzugt ist. Eine vollständige Einstellung der Dipole in Feldrichtung wird von der Wärmebewegung verhindert. Im Volumen  $V$  des magnetisierten Körpers möge so durch das Feld das magnetische Moment

$$\vec{m} = \int_V \vec{J} dV \quad (2-1)$$

hervorgehoben werden. Die Größe  $\vec{J}$ , die magnetische Polarisation, verändert als Beitrag des magnetisierten Materials die Induktion  $\vec{B}$ , es gilt

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} \quad (2-2)$$

mit der Induktionskonstanten  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1}$ .

Bei kleinen Feldstärken ist  $\vec{J}$  proportional zu  $\vec{H}$ , es gilt

$$\vec{J} = \chi \mu_0 \vec{H} \quad (2-3)$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\chi$ , die Suszeptibilität (lat.: Reizbarkeit), ist eine Materialeigenschaft.

Mit (2-2) und (2-3) findet man dann

$$\vec{B} = (\chi + 1)\mu_0 \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (2-4)$$

wobei  $\mu_r = \chi + 1$  als relative Permeabilität (lat.: Durchlässigkeit) bezeichnet wird. Für  $\mu = \mu_r \mu_0$  wird der Begriff Permeabilität verwendet. Für Paramagnetika ist  $\mu_r > 1$  und  $\chi$  in der Größenordnung  $10^{-5}$ .

Für diamagnetische Stoffe sollte man nach den obigen Überlegungen wegen des verschwindenden atomaren Dipolmomentes eigentlich gar keine Magnetisierung erwarten. Tatsächlich findet man aber  $\mu_r < 1$  und ein negatives  $\chi$  der Größenordnung  $10^{-5}$ , weil beim Anlegen des Feldes im Material gegen das Feld gerichtete Dipole induziert werden. Der Diamagnetismus tritt bei allen Stoffen auf, wird jedoch bei gleichzeitigem Auftreten von Para- oder Ferromagnetismus von diesen verdeckt.

Setzt man ferromagnetisches Material einem Feld aus, so vergrößern sich zunächst die Dipolmomente derjenigen WEISS'schen Bezirke, die bereits günstig zum Feld ausgerichtet sind. Damit wachsen  $J$  und  $B$ . Steigert man die Feldstärke  $H$  weiter, so werden die Dipolmomente weiterer WEISS'scher Bezirke zum Feld gerichtet, die Induktion  $B$  steigt entsprechend der Neukurve N (Bild 1) an. Sind die Dipolmomente aller WEISS'schen Bezirke ausgerichtet, so erreicht  $B$  einen Sättigungswert  $B_S$ .

Zwischen  $B$  und  $H$  herrscht kein linearer Zusammenhang mehr. Will man (2-3) und (2-4) aufrechterhalten, so muss man  $\mu_r$  und  $\chi$  als Funktionen von  $H$  auffassen. Ferromagnetische Permeabilitäten (und Suszeptibilitäten) erreichen sehr große Werte ( $10^3 \dots 10^5$ ).

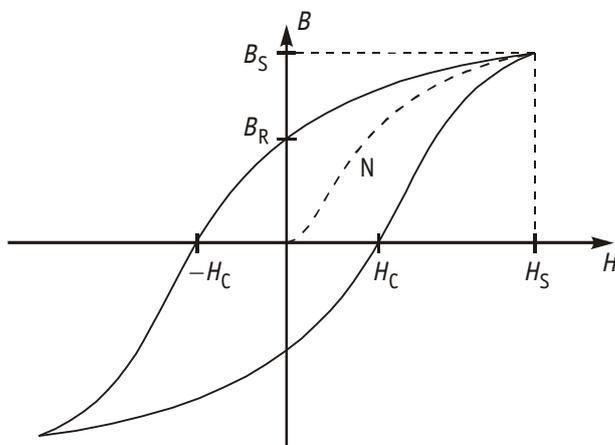


Bild 1 Hystereseschleife

Reduziert man nach erfolgter Sättigung die Feldstärke wieder, so wird die Neukurve nicht einfach in umgekehrter Richtung durchlaufen. Für  $H = 0$  gelangt man vielmehr zur Induktion  $B_R$  (Remanenz). Ein Teil der durch das Feld ausgerichteten Dipole behält also auch ohne Feld seine Orientierung bei. Diese Remanenz nutzt man bei der Herstellung von Permanentmagneten. Um das Material zu entmagnetisieren, muss eine Gegenfeldstärke (Koerzitivfeldstärke  $H_C$ ) angelegt werden. Danach kann das Material bis zur Sättigung ummagnetisiert werden. Der untere Kurvenast entspricht dem oberen bei Umkehrung der Feldstärkeänderungen.

Die geschlossene Kurve heißt Hystereseschleife [Hysteresis (gr.): Zurückbleiben]. Nimmt man eine Schar von Hystereseschleifen mit unterschiedlichem  $H_S$  auf, so liegen ihre Spitzen alle auf der sogenannten Kommutierungskurve. Zur Änderung des Feldes ist (pro Volumeneinheit) die Arbeit

$$w_{12} = \int_{\vec{H}_1}^{\vec{H}_2} \vec{B} d\vec{H} \quad (2-5)$$

zu leisten.

Berechnet man (2-5) für einen vollständigen Umlauf um die Hystereseschleife, so findet man, dass der von der Schleife umschlossene Bereich die Verlustarbeit  $w$  pro Volumeneinheit darstellt. Im Versuch wird der Kern einem harmonischen Wechselfeld ausgesetzt. Alle für den Magnetwerkstoff ermittelten Werte sind also dynamische Werte. Wenn ein Wechselstrom (Frequenz  $f$ ) einen Kern (Volumen  $V$ ) ständig ummagnetisiert, tritt die mittlere Verlustleistung

$$\bar{P} = f V w \quad (2-6)$$

auf. Sie wird für das Ummagnetisieren des Materials und zur Induktion von Wirbelströmen verbraucht und letztlich in Wärmeleistung umgewandelt.

### 3 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung nach Bild 2 erlaubt die Aufnahme der Hystereseschleife mit einem Messinterface und ihre Darstellung auf dem PC-Monitor.

Am Generator  $G$  wird eine sinusförmige Wechselspannung  $U$  der Frequenz  $f$  eingestellt. Der  $U$ - $I$ -Wandler wandelt diese mit dem Faktor  $k=0,1 \text{ A/V}$  lastunabhängig in eine Stromstärke  $I_1$ . Die Spannungsabfälle am Vorwiderstand  $R_V$  und am Kondensator  $C$  werden über ein Messinterface am PC registriert, wobei die Spannung am Kondensator zuvor (lediglich aus messtechnischen Gründen) 100-fach verstärkt (und invertiert) wird.

Der zu untersuchende Magnetwerkstoff bildet das Kernmaterial eines geschlossenen magnetischen Kreises mit einer Feldspule (Windungszahl  $N_1$ ) und einer Induktionsspule (Windungszahl  $N_2$ ).

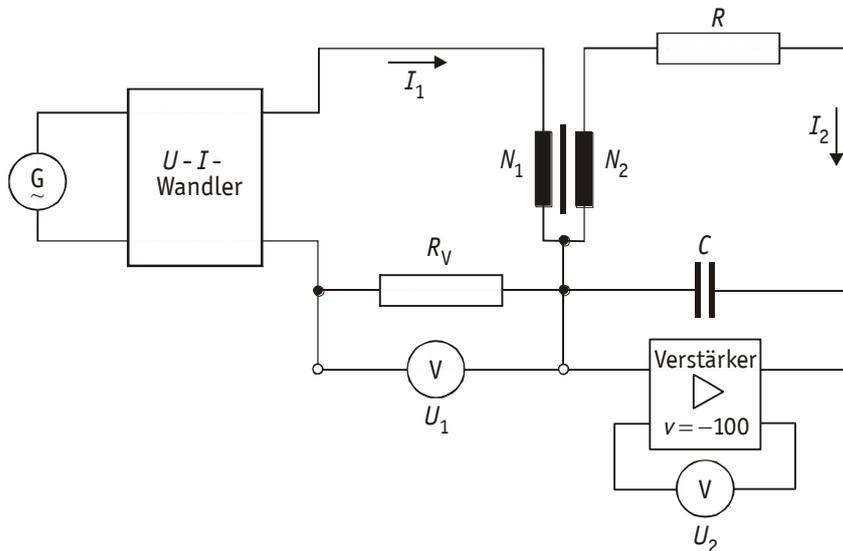


Bild 2 Versuchsanordnung

Der Feldstrom  $I_1$  bewirkt im magnetischen Kreis eine Feldstärke  $H$ , die in guter Näherung innerhalb der Spule konstant ist. Das Streufeld im Außenraum der Spule ist vernachlässigbar klein. So findet man nach dem Durchflutungsgesetz mit einer geschlossenen Feldlinie als Integrationsweg (wobei nur im Spuleninneren der Länge  $l$  ein Beitrag entsteht):

$$\oint \vec{H} \, d\vec{r} = Hl = \iint \vec{j} \, d\vec{A} = N_1 I_1 \quad (3-1)$$

In (3-1) ist  $\vec{j}$  die Stromdichte und  $d\vec{A}$  das Flächenelement des Leiterquerschnittes.

Der Strom  $I_1$  fließt auch durch den Vorwiderstand  $R_V$ , der Spannungsabfall

$$U_1 = R_V I_1 \quad (3-2)$$

wird gemessen (die Spannungsmessersymbole in Bild 2 stehen jeweils für einen Spannungseingang am Messinterface des PC). Zwischen  $U_1$  und der Feldstärke  $H$  besteht somit nach (3-1) und (3-2) der Zusammenhang

$$H = \frac{N_1}{l R_V} U_1 = k_H U_1 \quad (3-3)$$

Bei einem Kernquerschnitt  $A$  und einem Fluss  $\Phi = BA$  wird in der Induktionsspule die Spannung

$$U_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dt} \quad (3-4)$$

induziert. Um eine zu  $B$  proportionale Messgröße zu gewinnen, legt man  $U_i$  an den Eingang eines  $RC$ -Integrators. Dieser ist so dimensioniert, dass  $R$  groß gegen den kapazitiven Blindwiderstand  $\frac{1}{\omega C}$  ist.

Die Stromstärke im  $RC$ -Glied ist also annähernd  $I_2 = \frac{U_i}{R}$ . Wegen  $I_2 = \frac{dQ}{dt}$  folgt dann für die Kondensatorspannung

$$U_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 \, dt = \frac{1}{RC} \int U_i \, dt \quad (3-5)$$

Aus (3-4) und (3-5) und mit  $U_2 = -100 U_C$  erhält man die gewünschte Proportionalität  $B \sim U_C$  (bzw.  $B \sim U_2$ )

$$B = -\frac{RC}{N_2 A} U_C = -\frac{RC}{N_2 A} \frac{U_2}{(-100)} = \frac{RC}{100 N_2 A} U_2 = k_B U_2 \quad (3-6)$$

Dabei ist  $U_2$  die vom PC registrierte Spannung, die durch 100-fache Verstärkung und Invertierung der Kondensatorspannung  $U_C$  entsteht.

Es werden zunächst  $U_1(t)$  und  $U_2(t)$  simultan gemessen, dann wird die Graphik  $U_2(U_1)$  auf dem Bildschirm ausgegeben. Sie ist der Hystereseschleife  $B(H)$  proportional. An ihr werden alle erforderlichen Auswertungen vorgenommen. Die Umrechnung der Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  in  $H$  bzw.  $B$  erfolgt nach (3-3) bzw. (3-6).

#### 4 Aufgaben

In diesem Abschnitt werden die zu bearbeitenden Aufgaben nur grundsätzlich aufgeführt.

Genauere Hinweise zur Versuchsdurchführung befinden sich am Arbeitsplatz.

- 4.1 Man berechne die Faktoren  $k_H$  und  $k_B$  unter Verwendung der am Arbeitsplatz befindlichen Angaben.
- 4.2 Man wähle eine feste Frequenz, variiere mit der Generatorspannung den Feldstrom und nehme für eine Probe eine Schar von Hystereseschleifen  $B(H)$  auf. Aus deren Spitzenwerten ermittle man die Kommutierungskurve und stelle sie graphisch dar.
- 4.3 An der Kommutierungskurve ermittle man punktweise  $\mu_r$  und stelle es als Funktion von  $H$  dar.
- 4.4 Für eine andere Probe nehme man bei fester Generatorspannung die Hystereseschleifen für zwei verschiedene Frequenzen auf. Man bestimme für beide Hystereseschleifen die umschlossene "Fläche" (durch Integration), die Verlustarbeit  $w$  und die mittlere Verlustleistung  $\bar{P}$ .
- 4.5 An einer der Schleifen aus 4.4 ermittle man Remanenz und Koerzitivfeldstärke.

#### 5 Fragen

- 5.1 Skizzieren Sie die Versuchsanordnung (Generator,  $U-I$ -Wandler, Übertrager mit Magnetwerkstoff,  $RC$ -Integrator, Vorwiderstand, Spannungsmessgeräte).
- 5.2 Ein 14 cm langer und 1 cm dicker zylindrischer Eisenstab ( $\mu_r = 3000$ ) ist dicht mit 600 Windungen Draht umwickelt, durch den ein Gleichstrom der Stärke  $I = 1,7$  A fließt. Wie groß ist die im Stab gespeicherte magnetische Feldenergie? ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs A}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )
- 5.3 Zeigen Sie, dass der Spannungsabfall  $U_1$  am Vorwiderstand  $R_V$  der Feldstärke  $H$  proportional ist.
- 5.4 Vergleichen Sie die typischen Hystereseschleifen hart- und weichmagnetischer Werkstoffe miteinander und nennen Sie Einsatzgebiete für diese Werkstoffe.
- 5.5 Welche Beziehungen bestehen zwischen Feldstärke, Induktion und magnetischer Polarisation?
- 5.6 Zeigen Sie, dass die von der Hystereseschleife umschlossene "Fläche" eine Arbeit pro Volumeneinheit darstellt.
- 5.7 Erläutern Sie die magnetische Hysterese anhand eines Durchlaufes der Hystereseschleife.
- 5.8 Berechnen Sie mit Hilfe des Durchflutungsgesetzes die magnetische Feldstärke  $H$  in einer geraden langen Spule (Länge  $l$ , Windungszahl  $N$ , Stromstärke  $I$ ).
- 5.9 In welchen Maßeinheiten sind die Größen  $\vec{m}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$  und  $\vec{J}$  anzugeben?
- 5.10 Erklären Sie die Wirkungsweise des  $RC$ -Integrators.

#### Literatur

- |                                  |   |   |
|----------------------------------|---|---|
| [ 1 ] Schenk/Kremer :<br>(Hrsg.) | Physikalisches Praktikum<br>Springer Spektrum, Heidelberg,<br>Wiesbaden, 2014<br>ISBN : 978-3-658-00665-5 | [ 2 ] Philippow, E. (Hrsg.) :<br>Taschenbuch Elektrotechnik,<br>Bd. 1<br>Verlag Technik, Berlin, 1986<br>ISBN : 3-341-00201-4 |
| [ 3 ] Hering, E. u. a. :         | Physik für Ingenieure<br>Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012 ISBN : 978-3-642-22568-0               |   |