

## Aufgabenblatt 9 (Labor 3)

letzte Änderung: 04.01.2018

### *Thema: Hysteresekurve und Permeabilität magnetischer Werkstoffe*

#### **Einleitung:**

In diesem Labor betrachten wir die Hysteresekurve und die Bestimmung der relativen Permeabilität  $\mu_r$  magnetischer Werkstoffe. Die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  und die dazu gehörenden Flussdichte  $\vec{B}$  sind zwei Größen, die magnetische Eigenschaften eines Materials beschreiben. Die Materialbeziehung zwischen dem magnetischen Feld und der magnetischen Flussdichte wird über die Permeabilität  $\mu$  beschrieben:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Im Vakuum, ohne Anwesenheit von Materie, nimmt die Permeabilität den Wert:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

an. Dieser Ausdruck für  $\mu_0$  ist exakt, da dieser per Konvention festgelegt wurde. Der Einfluss unterschiedlicher Materialien wird durch relative Materialwerte  $\mu_r$  charakterisiert:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

Die Größe  $\mu_r$ , die relative Permeabilität, ist dimensionslos und im i.A. größer als Eins. Die absolute Größe  $\mu_0$  weist dagegen in SI-Einheiten sehr kleine Zahlenwerte auf. Dies ist ein Hinweis auf die Dimensionierung der Einheiten der Feldgröße: Für die Feldstärke  $\vec{H}$  sind auch „große“ Werte technisch problemlos zu realisieren, also etwa mehrere Megaampere pro Meter. Dagegen bewegt sich die magnetische Flussdichte typischerweise in einem deutlich kleineren Wertebereich. Magnetfelder von Elektromagneten können Flussdichten von bis zu 100 Tesla annehmen, dagegen erreichen Permanentmagnete lediglich Flussdichten von einigen Tesla (z.B. Huftisenmagnet 0,1T).

Elektromagnetische Materialien werden eingeteilt in diamagnetisch, paramagnetisch und ferromagnetisch, wobei die ferromagnetischen Werkstoffe weiter in die Kategorien weich- und hartmagnetisch unterteilt werden. Weichmagnetische Werkstoffe unterscheiden sich hinsichtlich der hartmagnetischen Werkstoffe dadurch, dass die Magnetisierung nach einwirken eines magnetischen Feldes und durchlaufen der Hysteresekurve größtenteils wieder verloren geht. Für die Herstellung von Magneten werden daher vorwiegend hartmagnetische Werkstoffe genutzt, da diese nach einer erfolgten Magnetisierung ihr Magnetfeld beibehalten. Der Magnetisierungsvorgang kann anhand der Abbildung 1 wie folgt beschrieben werden.

Die magnetische Flussdichte  $B$  eines Werkstoffes wird über die magnetische Feldstärke  $H$  aufgetragen. In der Praxis wird dieses Verhalten oft anhand der B-H-Kennlinie beschrieben, welche als Hysteresekurve bekannt ist. Die Hysteresekurve in Abbildung 1 beschreibt den Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte und der magnetischen Feldstärke und beinhaltet unter anderem folgende Kenngrößen; die Sättigungsmagnetisierung  $B_S$ , die Remanenz  $B_R$  sowie die Koerzitivfeldstärke  $H_C$ . Hierbei gibt die Sättigungsmagnetisierung die maximal erreichbare Magnetisierung des Werkstoffes an, die Remanenz beschreibt die Restmagnetisierung des Werkstoffes nach Anlegen eines magnetischen Feldes und die Koerzitivfeldstärke wiederum ist ein Maß für die Güte einer Magnetisierung. Je höher die Koerzitivfeldstärke eines Werkstoffes ist, desto besser behält dieses seine Magnetisierung nach Anlegen eines Magnetfeldes bei.

Wird eine wechselförmige magnetische Erregung (= ein elektrischer Strom) an ferromagnetischen Werkstoffen angelegt, wird die dargestellte Hysteresekurve mit der gewählten Frequenz periodisch durchlaufen.

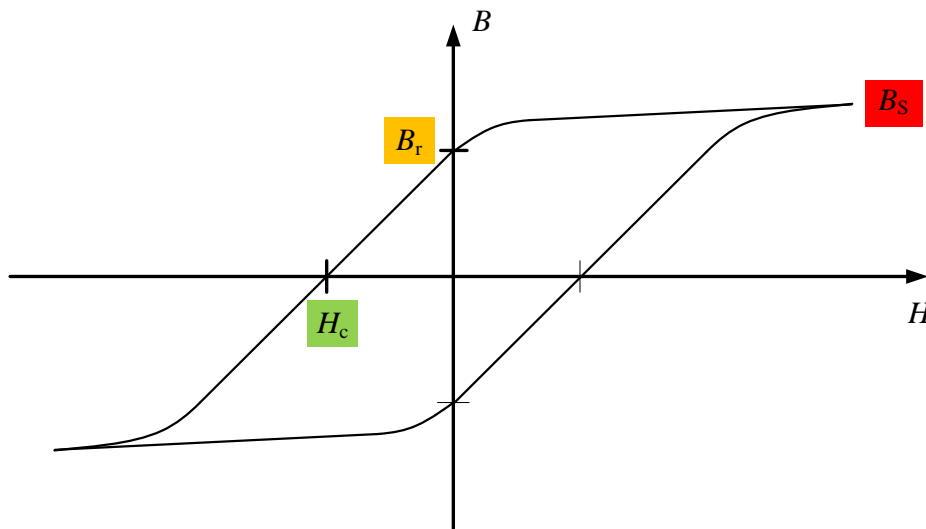


Abbildung 1. Hysteresekurve

In diesem Zusammenhang zeigt die Hysteresekurve für einen geschlossenen Ummagnetisierungszyklus die Verluste in Form der Fläche unter der Kurve an. Die Verluste entstehen bei der Energieumwandlung in Form von Wärme und werden üblicherweise als Hystereseverluste bezeichnet. Die Form der Hysteresekurve ist abhängig vom magnetischen Werkstoff. Weichmagnetische Werkstoffe besitzen im Gegensatz zu hartmagnetischen Werkstoffen eine kleinere eingeschlossene Fläche.

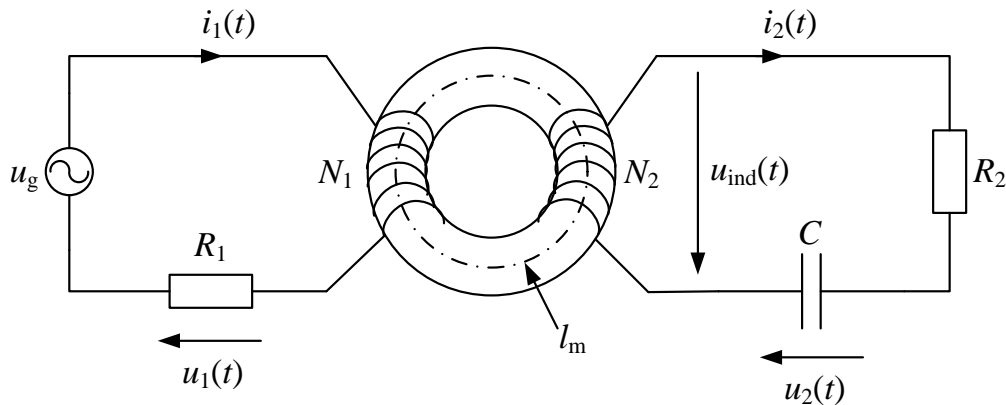


Abbildung 2. Übertrageranordnung zur Aufnahme der Hysteresekurve

Das Ziel dieses Labors ist die Aufnahme der Hysteresekurve und die Bestimmung der relativen Permeabilität  $\mu_r$ . Bei ferromagnetischen Werkstoffen ist diese abhängig von der magnetischen Feldstärke und von der Frequenz. Die magnetische Feldstärke und Flussdichte kann über eine Übertragerschaltung (Abbildung 2) gemessen werden. Die Schaltung wird an der Primärseite mit einem Funktionsgenerator über einen Widerstand  $R_1$  mit der Primärwicklung  $N_1$  der Spule verbunden. Setzen wir die Gleichung der magnetischen Feldstärke für die Primärseite der Stromdurchflossene Zylinderspule an, erhalten wir folgenden Zusammenhang:

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i_1(t)}{l_m}, \text{ mit } i_1(t) = \frac{u_1(t)}{R_1} \quad (1)$$

Daraus folgt:

$$H(t) = \frac{N_1}{l_m R_1} \cdot u_1(t) = K_1 \cdot u_1(t), \text{ mit } K_1 = \frac{N_1}{l_m R_1} \quad (2)$$

Die Länge des magnetischen Kerns  $l_m$  lässt mit:

$$l_m = \frac{d_i + d_a}{2} \cdot \pi \quad (3)$$

angeben. Über die Sekundärseite lässt sich über das RC-Tiefpassfilter die magnetische Flussdichte berechnen. Nach dem Induktionsgesetz lässt sich die induzierte Spannung  $u_{ind}(t)$  berechnen.

$$u_{ind}(t) = -\frac{d\Psi}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

Wobei die Fläche  $A$  der Querschnittfläche des Kernes ist.

Da wir die induzierte Spannung an der Sekundärseite der Spule messtechnisch nicht bestimmen können, wählen wir den Umweg über das eingebaute RC-Tiefpassfilter.

$$u_2(t) = u_C = \frac{1}{R_2 C} \int u_{ind}(t) \cdot dt \quad (5)$$

$$\text{für } R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$$

Indem wir Gleichung (4) in (5) einsetzen, erhalten wir:

$$u_2(t) = -\frac{N_2 A}{R_2 C} \int \frac{dB}{dt} \cdot dt = -\frac{N_2 A}{R_2 C} \int dB$$

Das unbestimmte Integral ergibt:

$$u_2(t) = \frac{N_2 A}{R_2 C} \cdot B \quad \text{bzw.} \quad B(t) = \frac{R_2 C}{N_2 A} \cdot u_2(t) = K_2 \cdot u_2(t) \quad \text{mit } K_2 = \frac{R_2 C}{N_2 A} \quad (6)$$

Mit den Gleichungen (2) und (6) bekommen wir den Zusammenhang für  $H - u_1$  und  $B - u_2$ .

Wenn die magnetische Feldstärke  $H$  und die magnetische Flussdichte  $B$  bekannt sind, kann die magnetische Permeabilität bestimmt werden:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \frac{1}{\mu_0} \frac{K_2 u_2}{K_1 u_1} \quad (7)$$

## 1. Vorbereitungsaufgaben

a) Erläutern Sie schriftlich folgende Begriffe:

- Magnetisches Feld und magnetische Flussdichte/Induktion
- Permeabilität
- Hysterese
- Neukurve
- Sättigungsmagnetisierung, Remanenzinduktion und Koerzitivfeldstärke
- Magnetisierungsverluste

b) Beschreiben Sie den Vorgang der Magnetisierung, angefangen vom entmagnetisierten Zustand, anhand des Verlaufes der Hysteresekurve.

c) Zeichnen Sie qualitativ zwei Hysteresekurven in einem Diagramm, die weich- und hartmagnetische Werkstoffe im Vergleich darstellen.

d) Bestimmen Sie die Konstanten  $K_1$  und  $K_2$  in der Gleichung (2) und (6), wenn folgende geometrische und elektrische Daten vorgegeben sind:

$d_a$ (mm)	$d_i$ (mm)	$h$ (mm)	$N_1$	$N_2$	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C$ (nF)
25	14	14	20	20	1	10000	100

$d_a$  und  $d_i$  sind entsprechend der Außen- und Innendurchmesser des Ringkerns.

## 2. Versuchsdurchführung

- Schließen Sie den 50  $\Omega$  Ausgang des Funktionsgenerators an Kanal 1 (CH1) des Oszilloskops und stellen Sie mit dem Funktionsgenerator ein Sinussignal mit einer Frequenz von 4 kHz und einer Amplitude von 1 V ein. Überprüfen Sie Ihre Einstellung am Oszilloskop.
- Stellen Sie die Spannungsquelle auf 18 V ein und überprüfen Sie ggf. ihre Spannung mit einem Multimeter.
- Schließen Sie den Ausgang der Spannungsquelle an die Versorgungsbuchse des Verstärkers „+12...18 V“ und „0 V“ auf der Versuchsplatine an.
- Schließen Sie zusätzlich den Ausgang des Funktionsgenerators an den Eingang „Sig in“ der Versuchsplatine an. Schalten Sie auf jeden Fall vorher die 18 V Spannungsquelle aus, bevor man den Funktionsgenerator mit dem Eingang „Sig in“ verbindet. Messen Sie den Ausgang des Verstärkers (Buchsen „Ausgang“ auf der Versuchsplatine) mit dem Oszilloskop. Stellen Sie die Amplitude des verstärkten Signals  $u_g(t)$  auf 6 V ein.
- Bauen Sie den Versuch nach der Abbildung 3 auf.

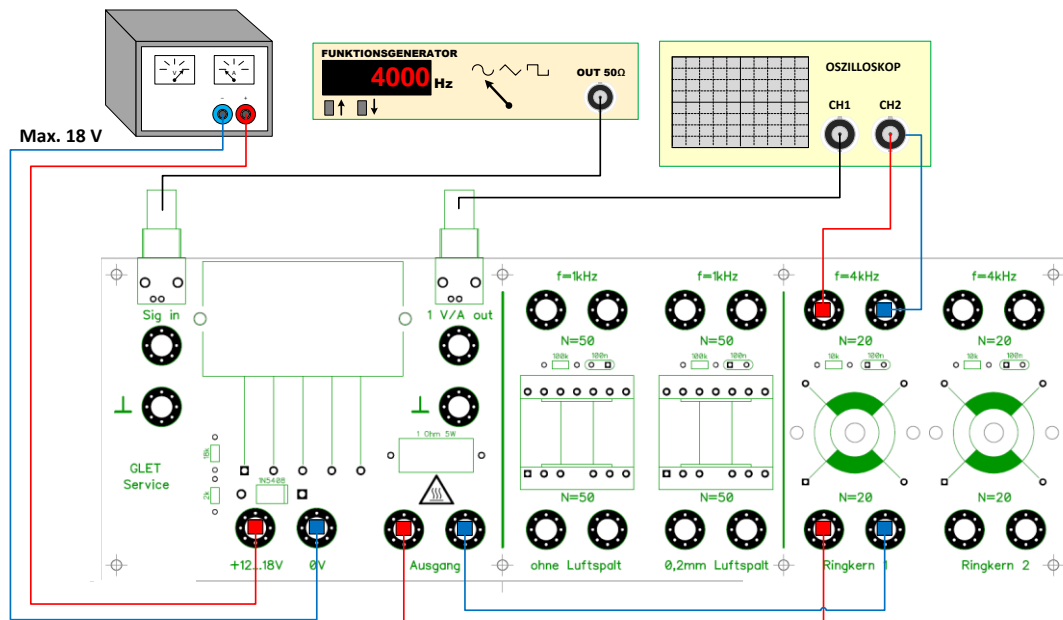
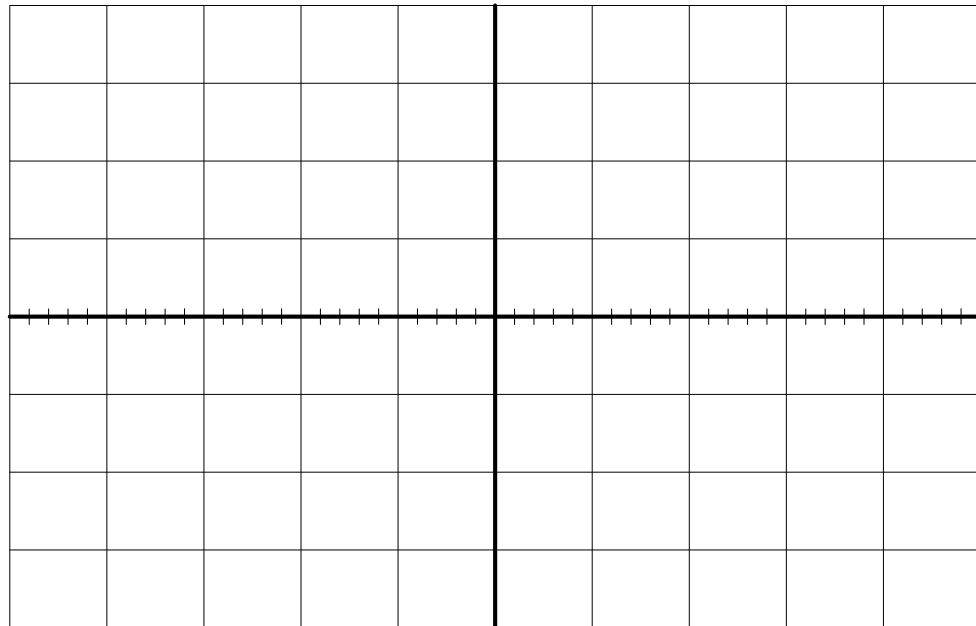


Abbildung 3. Versuchsaufbau

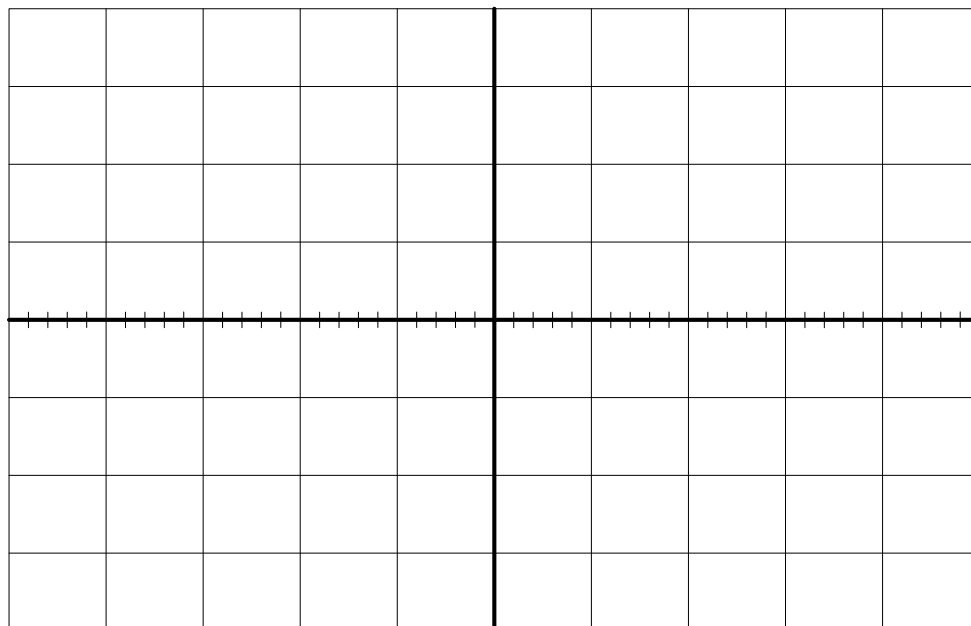
### Hysteresekurven aufzeichnen

- a) Die Hysteresekurve des magnetischen Kernes soll aufgenommen werden.
- Stellen Sie das Anzeigemodus des Oszilloskops auf X-Y-Ansicht ein und überprüfen Sie, dass  $u_1$  an CH1 und  $u_2$  an CH2 angeschlossen sind.
  - Beobachten Sie die Hysteresekurve am Oszilloskop. Tauschen Sie ggf. die Anschlüsse am CH2 falls das Bild spiegelverkehrt ist.
  - Stellen Sie die Spannungsskalierung so ein, dass die Hysteresekurve am Bildschirm vollständig abgebildet ist und der Sättigungsbereich nicht abgeschnitten ist. Notieren Sie diese Achsenskalierung im unteren Diagramm und zeichnen Sie den Kurvenverlauf nach oder machen Sie ein Foto von dem Bildschirm.



x-Achse:                      /DIV      y-Achse:                      /DIV

- b) Wiederholen Sie den Messvorgang für den Ringkern 2 für 4 kHz. Achten Sie auf eine gleiche X-Y-Skalierung wie beim Ringkern 1. Vergleichen Sie die beiden Kurvenverläufe der Ringkerne 1 und 2, was stellen Sie fest?



x-Achse:                      /DIV      y-Achse:                      /DIV

### Kennlinie der relativen Permeabilität $\mu_r$ aufnehmen

- Stellen Sie das Oszilloskop wieder auf Zeitansicht um.
- Benutzen Sie nun wieder den Ringkern 1 und stellen Sie die Sinusspannung am CH1 mit dem Funktionsgenerator so ein, dass eine Spitze-Spitze-Spannung von  $U_{1pp} = 5 \text{ V}$  zu sehen ist. Notieren Sie die Werte von  $U_{2pp}$ .

- Verringern Sie die Spannung  $U_{1pp}$  in 0,5 V Schritten bis zu  $U_{1pp} = 0,5 \text{ V}$  und nehmen Sie weitere Werte für  $U_{2pp}$  auf. Verringern Sie die Spannung  $U_{1pp}$  in 0,1 V Schritten weiter bis zu  $U_{1pp} = 0,1 \text{ V}$  und notieren Sie die Werte für  $U_{2pp}$ .
- Wiederholen Sie die Messung für den Ringkern 2.

Ringkern 1					Ringkern 2				
$U_{1pp}$	$U_{2pp}$	$H$	$B$	$\mu_r$	$U_{1pp}$	$U_{2pp}$	$H$	$B$	$\mu_r$

### 3. Auswertung

- Lesen Sie aus den aufgezeichneten Hysteresekurven die Kenngrößen  $B_s$ ,  $B_r$  und  $H_c$  ab. Benutzen Sie die berechneten Konstanten  $K_1$  und  $K_2$ , um die elektrischen Größen in die magnetischen Größen umzurechnen.
- Welchen Ringkern würden Sie als Transformatorkern verwenden? Begründen Sie Ihre Antwort.
- Zeichnen Sie die Kennlinie der relativen Permeabilität  $\mu_r = f(H)$  von dem Ringkern 1 und 2 in Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke  $H$ .
- Interpretieren Sie die Wirkung des abfallenden Verlaufs von  $\mu_r$  auf eine elektronische Schaltung, z.B. bei einer Drossel bzw. Induktivität.

### 4. Fazit

Treffen Sie eine kurze Aussage über Übereinstimmung der gemessenen Hysteresekurven mit der Theorie und über die Nichtlinearität der relativen Permeabilität sowie ihre Abhängigkeit von  $H$ .