

## Versuch C 6: Magnetische Hysterese

**1. Literatur:** Bergmann-Schäfer, Experimentalphysik, Bd. II  
 Illberg, Physikalisches Praktikum f. Anfänger  
 Westphal, Physikalisches Praktikum  
 Kohlrausch, Praktische Physik, Bd. 2

**Stichworte:** Magn. Feldstärke, magn. Induktion, magn. Moment, Magnetisierung, Permeabilität, entmagnetisierendes Feld, Weißsche Bezirke, Hysterese, Spulen, Halleffekt, Hallsonde

### 2. Grundlagen

#### 2.1 Gleichung für magnetisierbare Körper

Mit der magnetischen Feldstärke  $H$  in einer magnetisierbaren Probe ist immer eine zweite magnetische Größe verbunden, die magn. Flussdichte oder Induktion  $B$ . Für magnetisch isotrope und homogen magnetisierte Körper gilt:

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

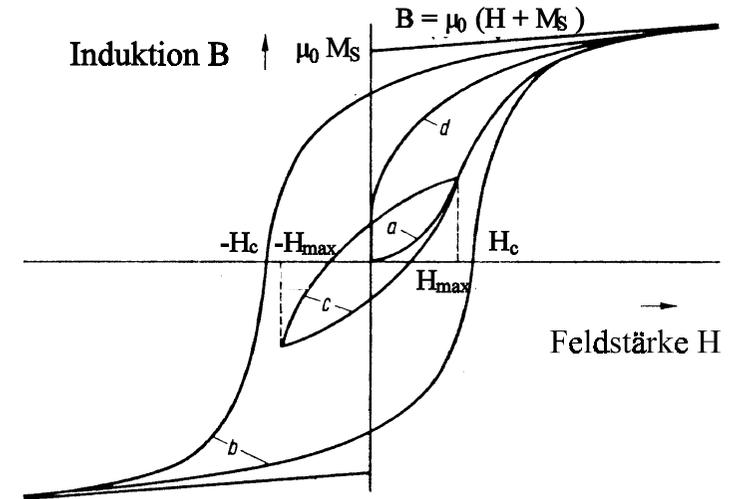
Hierbei ist  $\mu_0$  die Induktionskonstante,  $M$  die Magnetisierung und  $\mu$  die (dimensionslose) *magnetische Permeabilität* der Probe. Die magn. Induktion setzt sich also einem Anteil des Vakuums  $\mu_0 H$  und einem der Materie  $\mu_0 M$ , der sogenannten *magnetischen Polarisation*, zusammen. Für dia- und paramagnetische Körper ist  $\mu$  nahezu 1, für ferro- und ferrimagnetische Stoffe kann  $\mu$  sehr große Werte annehmen und hängt zudem vom Magnetisierungszustand des Körpers ab.

#### 2.2 Magnetische Hysterese

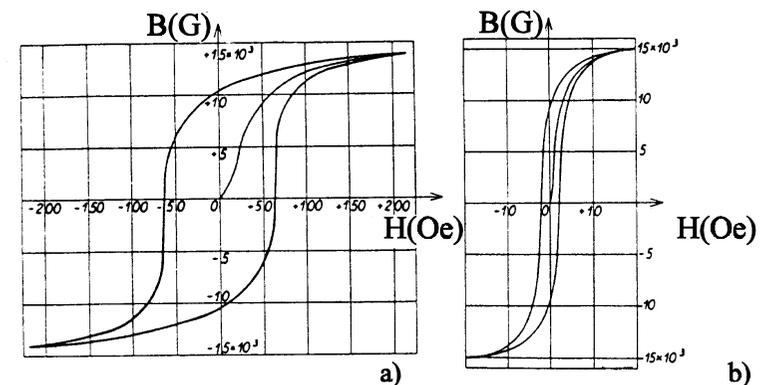
Misst man die magnetische Induktion  $B$  oder die Magnetisierung  $M$  eines Ferromagneten in Abhängigkeit von der steigenden und fallenden magnetischen Feldstärke  $H$ , erhält man eine sogenannte Hysteresekurve (s. Abb.1). Die nach einseitiger Sättigung  $M = M_s$  und Ausschalten des äußeren Magnetfeldes zurückbleibende Magnetisierung nennt man *Remanenz*  $M_r$ . Sie erklärt den Begriff Hysterese. *Hysterese* bedeutet Nachwirkung. Um die Remanenz aufzuheben, benötigt man ein magnetisches Gegenfeld, das *Koerzitivfeld*  $H_c$ .

Die von einer Hysteresekurve eingeschlossene Fläche stellt den Energieverlust für einen Ummagnetisierungszyklus dar. Dieser Verlust tritt in Form von Magnetisierungswärme auf. Die Magnetisierungskurve eines vorher abmagnetisierten

Ferromagneten ( $B = 0, M = 0$ ) nennt man *Neukurve* oder Jungfräuliche Kurve.

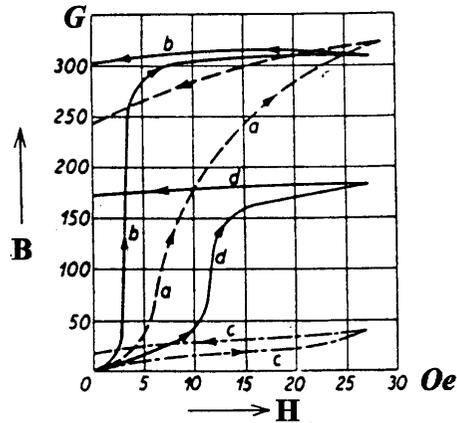


**Abb.1:** Induktions-Feldstärkekurven: a) Neukurve, b) Sättigungs-Hysterese-schleife, c) innere Hystereseschleife, d) ideale Induktionskurve



**Abb.2:** Hysteresekurve für a) Werkzeugstahl, b) weiches Schmiedeeisen

Die Form der Hysteresekurve eines Ferromagneten ist vor allem von seiner Zusammensetzung aber auch von seiner thermischen und mechanischen Vorbehandlung abhängig (siehe Abb.2 u.3).



**Abb.3:**

Hysteresekurven von weichem Nickeldraht:

- a) in mechanisch unbeanspruchtem Zustand
- b) bei Torsion
- c) bei Dehnung
- d) bei gleichzeitiger Torsion und Dehnung

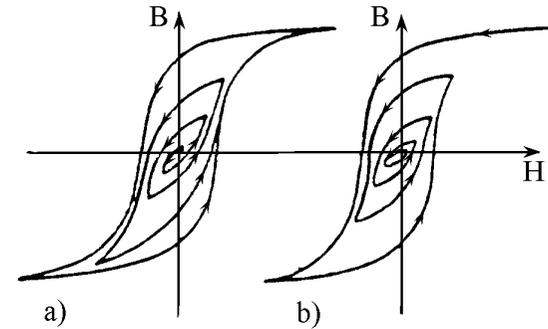
Einheiten: Induktion B: 1 T (Tesla) = 1Vs/m<sup>2</sup> = 10<sup>4</sup> G (Gauß)  
 Feldstärke H: 1 A/m = 4π/10<sup>3</sup> Oe ≈ 1/80 Oe (Oersted)

Jeder Ferromagnet setzt sich aus vielen Elementarmagneten zusammen, deren magnetische Momente in *Domänen*, den sogenannten *Weißschen Bezirken*, jeweils in die gleiche Richtung zeigen. Von Bezirk zu Bezirk wechselt die Richtung der magnetischen Momente. In einem abmagnetisierten Ferromagneten heben sich die Weißschen Bezirke in ihrer Feldwirkung nach außen auf. Bei wachsendem äußeren Feld verschieben sich zunächst die Wände der Weißschen Bezirke zugunsten der Bezirke, deren magnetische Momente in ihrer Richtung dem äußeren Feld am nächsten kommen. Die hierfür benötigte Energie ist relativ gering. Die Magnetisierungskurve steigt zunächst steil an. Wird das äußere Feld weiter verstärkt, drehen sich die Weißschen Bezirke in die Richtung des äußeren Feldes. Hierfür ist ein größerer Energieaufwand als für die Wandverschiebung erforderlich. Der Übergang von der Wandverschiebung zur Drehung erfolgt kontinuierlich, wobei die Magnetisierungskurve allmählich abflacht. Sind die Drehungen abgeschlossen, erreicht man den Bereich der Sättigung. Die Magnetisierung steigt nur noch wenig mit wachsender Feldstärke und nähert sich asymptotisch der Sättigungsmagnetisierung M<sub>s</sub>. Die Magnetisierung ist also der Feldstärke nicht proportional sondern hängt vom Magnetisierungszustand ab.

### 3. Messmethode zur Bestimmung der Neu- und Hysteresekurve

#### 3.1 Abmagnetisierung

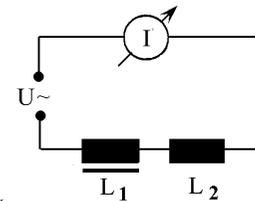
Eine Methode zur Abmagnetisierung eines Ferromagneten vor der Aufnahme einer Neukurve ist die Wechselfeldmethode. Dabei setzt man die Probe einem magnetischen Wechselfeld aus, dessen Amplitude H<sub>0</sub> langsam im Vergleich zur Periodendauer vom Maximalwert auf den Wert 0 verringert wird. Das magnetische Verhalten des Ferromagneten hierbei zeigt schematisch Abb. 4b, die im Versuch verwendete Schaltungsanordnung Abb. 5.



**Abb.4:** Aufeinanderfolgende Magnetisierungszyklen bei  
 a) zunehmender, b) abnehmender Feldstärke

**Abb.5:**

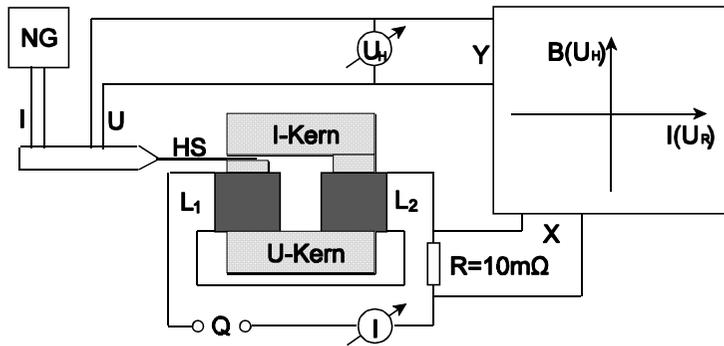
Schaltung zum Abmagnetisieren der Magnetkerne:



- L<sub>1</sub>: Spule 600W / 2A max mit kleinem Kern
- L<sub>2</sub>: Spule 600W / 2A max Abmagnetisierungsspule
- I: Amperemeter
- U: variable Wechselspannungsquelle

### 3.2 Neu- und Hysteresekurve

Die im Versuch verwendete Anordnung zur Bestimmung einer Magnetisierungskurve eines Ferromagneten zeigt Abb.6. Ein Transformator-U-Kern mit aufgeklebtem I- oder zweiten U-Kern bildet mit zwei Feldspulen der Windungszahl  $n$  (bzw. einer mit Windungszahl  $2n$ ) einen Elektromagneten, der mit Gleichstrom aus einer regelbaren Stromquelle  $Q$  erregt wird. Zwischen den Kernen besteht ein schmaler Luftspalt, in dem die magn. Induktion  $B$  mit einer Hallsonde gemessen werden kann. Die Sonde liefert bei konstantem Messstrom eine der Induktion  $B$  proportionale Hallspannung  $U_H$ , die mit einem mV-Meter gemessen und auf der Y-Achse eines XY-Schreibers aufgetragen wird. Auf dessen X-Achse wird die dem Erregerstrom  $I$  der Feldspulen proportionale Spannung  $U = I R$  ( $R = 10m\Omega$ ) aufgetragen. Die Messanordnung gestattet die Aufnahme von



**Abb.6:** Versuchsaufbau zur Bestimmung der Neukurve und Hysterese-schleife  $B(I)$  eines Magnetkerns.  $Q$ : Gleichstromquelle  $-2A...2A$ ,  $HS$  /  $NG$ : Hallsonde / Netzgerät,  $L_{1,2}$  bzw.  $L_3$ : Erregerspulen ( $n = 2 \times 600W/2A$  max. bzw.  $1200W/1A$  max.)

Neu- bzw. Hysteresekurven  $B(I)$  für verschiedene Kernmaterialien.

Man kann den U- und I-Kern (bzw. doppelten U-Kern) näherungsweise als Toroid mit Luftspalt auffassen. Für einen solchen magnetisch nahezu geschlossenen Kreis verlaufen die Feldlinien nur im Inneren des Kerns und im Luftspalt. Magnetische Streufelder, die dem magnetisierenden Feld außer dem des Luftspaltes entgegenwirken (Entmagnetisierungsfelder) können (zunächst) vernachlässigt werden. Für einen solchen geschlossenen magnetischen Kreis gilt:

$$\oint H ds = H_i l + H_a d = n I \quad (2)$$

Hierbei ist  $\oint H ds$  das Wegintegral der magnetischen Feldstärke  $H$  längs eines geschlossenen Weges im magnetischen Kreis.  $H_i$  und  $H_a$  sind die Feldstärken im Kern mit Polschuhen bzw. im Luftspalt,  $l$  ist die gemittelte Länge der Feldlinien  $H_i$  und  $d$  die Dicke des Luftspaltes.  $n$  ist die Gesamtzahl der Spulenwindungen und  $I$  die Stärke des Erregerstroms. Aus der Bedingung, dass die Normalkomponente der magn. Induktion  $B_n$  an den Grenzflächen von Polschuhen und Spalt stetig verläuft, folgt mit der Annahme einer homogenen Induktion  $B = B_n$  aus Gl. (1):

$$B = B_a = \mu_0 H_a = B_i = \mu_0 \mu H_i \quad (3)$$

und mit Gl. (2) für das innere Feld  $H_i$ :

$$H_i = \frac{n I}{l} - \frac{B d}{l \mu_0} \quad (4)$$

sowie für die Permeabilität  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H_i} = \frac{B l}{\mu_0 n I - B d} \quad (5)$$

Man erkennt aus Gl. (4), dass das innere Feld infolge des Spalts um den Betrag  $Bd/l\mu_0$  kleiner ist als das eines geschlossenen Toroiden. Der Spalt wirkt also entmagnetisierend auf den Kern. Berücksichtigt man zusätzlich mögliche Streufeldverluste, muss zur Bestimmung des wahren inneren Feldes im Kern ein weiteres entmagnetisierendes Feld  $H_e = N M$  von  $H_i$  in Gl. (4) abgezogen werden.  $M$  ist hierbei die Magnetisierung des Kerns und  $N$  ein von der Gestalt des Magneten abhängiger *Entmagnetisierungsfaktor*. Da für ferromagnetische Stoffe näherungsweise  $B = \mu_0 M$  gilt, ergibt sich für  $H_i$ :

$$H_i = \frac{n I}{l} - \frac{B d}{l \mu_0} - \frac{B N}{\mu_0} \quad (6)$$

bzw für die Induktion  $B$ :

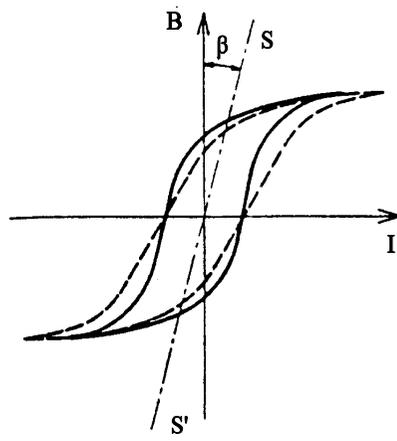
$$B = \mu \mu_0 H_i = \frac{\mu \mu_0 n}{l} \left( I - B \left( \frac{d}{\mu_0 n} + \frac{Nl}{\mu_0 n} \right) \right) \quad (7)$$

Man erhält die wahre Induktionskurve  $B(H_i)$  aus der Kurve  $B(I)$ , indem man jeden Abzissenwert  $I$  um den Bruchteil  $\{d/\mu_0 n + Nl/\mu_0 n\}$  des entsprechenden Ordinatenwertes  $B$  verringert. Ein solches Verfahren nennt man *Zurückscheren* der Induktionskurve  $B(I)$ , (siehe Abb.7). Die Schergerade  $S$   $S'$  schließt mit der Ordinate  $B$  den Winkel  $\beta$  ein, wobei

$$\tan \beta = \frac{d}{\mu_0 n} + \frac{Nl}{\mu_0 n} \quad (8)$$

Ist einer der beiden Terme auf der rechten Seite von Gl. (8) klein im Vergleich zum anderen, gilt mit  $\beta = \beta_1 + \beta_2$  näherungsweise:

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{d}{\mu_0 n}\right), \quad \beta_2 = \arctan\left(\frac{Nl}{\mu_0 n}\right) \quad (9)$$



**Abb.7:**  
Scherung einer Hystereseschleife

#### 4. Aufgabenstellung:

- 1. Aufgabe:** Bestimmen Sie mit der in Abb.6 gezeigten Anordnung die magnetische Induktion im Spalt des Eisenkerns in Abhängigkeit vom Erregerstrom für die Neukurve und einen Ummagnetisierungszyklus.
- 2. Aufgabe:** Bestimmen Sie die magnetische Induktion im Spalt eines Ferritkerns in Abhängigkeit vom Erregerstrom für einen Ummagnetisierungszyklus.
- 3. Aufgabe:** Berechnen Sie für jeden Messwert  $B$  der Neukurve die Feldstärke  $H_i$  sowie die magnetische Permeabilität  $\mu$  des Eisenkerns und stellen Sie die Größen  $B(H_i)$  und  $\mu(H_i)$  graphisch dar.
- 4. Aufgabe:** Bestimmen Sie den durch Streufeldverluste verursachten Entmagnetisierungsfaktor für den Eisen- und den Ferritkern.

#### 5. Versuchsdurchführung

##### 5.1 Abmagnetisieren

Vor jeder neuen Versuchsreihe sind die Kerne des Eisen-Magneten abzumagnetisieren. Benutzen Sie dazu den Aufbau gemäß Abb. 5. Die Kerne werden in die Spule  $L_2$  geschoben und langsam wieder herausgezogen. Um vor der Abmagnetisierung eine möglichst maximale Erregung der Kerne zu erreichen, kann der Kern aus Spule  $L_1$  vorsichtig so weit herausgezogen werden, bis der Spulenstrom 2 A erreicht hat. Der Vorgang des Abmagnetisierens kann mehrmals, sollte jedoch mindestens einmal wiederholt werden. Prüfen Sie gegebenenfalls die abmagnetisierten Kerne mit der Hallsonde.

##### 5.2 Aufnahme der Neukurve und der Hystereseschleifen

Der Aufbau für den Eisenkern (I+U-Kern) geschieht wie in Abb.6 gezeigt.

Einstellungen des XY-Schreibers:

- Nullstellung: Blattmitte
- Empfindlichkeit x: 10mV/cm var. ( $2A \triangleq 10cm$ )
- Empfindlichkeit y: 1mV/cm cal. ( $100mT \triangleq 1cm$ )

Die Schreibereinstellungen sind ohne Erregung des Magnetkerns vorzunehmen.

Erhöhen Sie langsam den Erregerstrom  $I$  von Null beginnend in Schritten von ca. 0,1 A bis 2A. Eine Verminderung des eingestellten Stromwertes ist hierbei unbedingt zu vermeiden. Notieren Sie neben der Aufnahme der Schreiberkurve für jeden eingestellten Stromwert die Hallspannung  $U_H(I)$  bzw. die Induktion  $B(I)$ . Zur Aufnahme der Hysteresekurve verändern Sie darauf langsam den Strom  $I$  (wieder nur in einer Richtung) von +2A nach -2A und darauf von -2A zurück nach +2A. Nach Anheben des Schreiberstifts ist der Strom auf Null zu stellen.

Zur Aufnahme der Hysteresekurve des Ferritkerns (2x U-Kern) ist lediglich eine Erregerspule (1200W, 1A max.) zu verwenden. **Vorsicht** beim Einbau der Kerne. Diese sind sehr spröde und splintern leicht!

Einstellungen des XY-Schreibers:

Nullstellung: Blattmitte

Empfindlichkeit x: 1mV/cm cal. (1A  $\triangleq$  10cm)

Empfindlichkeit y: 1mV/cm var. (100mT  $\triangleq$  2cm)

Variieren Sie den Erregerstrom von Null beginnend (jeweils nur in eine Richtung) nach +1A, dann nach -1A und zurück nach +1A. Nach Anheben des Schreiberstifts ist dann  $I$  auf Null zu stellen.

### 5.3 Auswertung

Berechnen Sie für jedes Wertepaar  $B(I)$  des Eisenkerns die Feldstärke  $H_i$  gem. Gl.(4) und die Permeabilität  $\mu$  gem. Gl. (5). Hierbei sind die Streufeldverluste zu vernachlässigen.

Tragen Sie die magn. Induktion  $B(H_i)$  und Permeabilität  $\mu(H_i)$  des Eisenkerns graphisch auf.

Spaltbreite des Eisenkerns:  $d = 0,8$  mm; magn. Weglänge:  $l = 354$  mm.

Berechnen Sie die durch den Luftspalt verursachte Entmagnetisierung gem. Gl.(4), bzw. Gl.(9), d.h. den durch sie im Graphen  $B(I)$  entstehenden Scherwinkel  $\beta_1$ . Schätzen Sie durch Vergleich von  $\beta_1$  mit dem gemessenen Winkel  $\beta$ , den die Hysteresekurve bei  $B = 0$  mit der B-Achse bildet, den noch verbleibenden Differenzwinkel  $\beta_2$  ab. Bestimmen Sie hieraus näherungsweise den Entmagnetisierungsfaktor  $N$ .

Verfahren Sie auf gleiche Weise mit den Ergebnissen für den Ferritkern.

Spaltbreite des Ferritkerns:  $d = 0,8$  mm; magn. Weglänge:  $l = 381$  mm.

Diskutieren Sie die Messergebnisse und mögliche Fehler bei der Messung und Auswertung.

### 6. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Welchen Zusammenhang beschreibt die *magnetische Permeabilität*  $\mu$  in magnetisierbaren Stoffen, wie groß ist sie für a) diamagnetische, b) paramagnetische, c) ferromagnetische Stoffe?
- 2) Was besagt der Begriff *magnetische Hysterese* bei Ferromagneten?
- 3) Diskutieren Sie den typischen Verlauf einer Hysteresekurve  $B(H)$  für einen Ferromagneten und beschreiben Sie die ihr zugrunde liegenden physikalischen Prozesse bei der Auf-, Ab- bzw. Ummagnetisierung!
- 4) Was besagen die Begriffe *Neukurve*, *Sättigung*, *Remanenz* und *Koerzitivfeldstärke* bei einem Ferromagneten?
- 5) Wie sollte die Remanenz und Koerzitivfeldstärke idealerweise a) für einen Dauermagneten, b) für einen Transformator Kern beschaffen sein?
- 6) Nennen Sie verschiedene experimentelle Methoden zur Bestimmung der magnetischen Induktion  $B$  im allgemeinen bzw. speziell zur Bestimmung von Induktionskurven  $B(H)$  von Ferromagneten.
- 7) Beschreiben Sie Größe und Wirkung des entmagnetisierenden Feldes anhand des Verlaufs der magn. Feldlinien für a) einen kurzen b) langen zylindrischen Stabmagneten, c) einen geschlossenen Toroiden d) einen Toroiden mit Luftspalt sowie e) die im Versuch benutzte Anordnung.
- 8) Welche Gleichung beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke  $H$  und dem erregenden elektr. Strom  $I$  in einem magnetischen Kreis?