

# Magnetische Felder, Ferromagnetismus



## 1. Einführung

### 1.1. Allgemeiner Zusammenhang

Magnetische Wechselwirkungen bestimmen neben den elektrischen Wechselwirkungen wesentlich den Aufbau und die Eigenschaften von Molekülen und festen Körpern.

### 1.2. Lernziele

In diesem Versuch sollen Sie die Phänomene kennenlernen, die bei Anwesenheit ferromagnetischer Stoffe im Magnetfeld einer Spule auftreten. Insbesondere soll dabei die Bedeutung der Begriffe magnetische Feldstärke ( $\vec{H}$ ), magnetische Induktion oder magnetische Flußdichte ( $\vec{B}$ ) und Magnetisierung ( $\vec{M}$ ) deutlich gemacht werden.

Mit der Hall-Sonde als Messgerät für die magnetische Induktion werden Sie den Einfluss eines Eisenkerns auf das Magnetfeld einer Luftspule untersuchen und Materialeigenschaften des Eisenkerns bestimmen (Magnetisierungskurve).

### 1.3. Literatur:

Rentschler, Physik für Naturwissenschaftler,

Bd. 1 S. 42 - 47, Bd. 2, 363 - 364, S.410 - 417

84 UC 172 R 422

Francon, Physik für Biologen, Chemiker und Geologen,

Bd. 1, S. 153-172, Teubner Verlag

84 UC 169 F 826-1

Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 2,

8. Auflage, S. 151 - 155

84 UC 143 B 499

Bedienungsanleitung

# Magnetische Felder, Ferromagnetismus

## 2. Grundlagen

### 2.1. Grundbegriffe

#### 2.1.1. Das Magnetfeld

Bei diesem Versuch geht es um das Magnetfeld. Es wird oft dargestellt durch die magnetischen Feldlinien, auf denen der Vektor der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  liegt. Das Magnetfeld wird durch elektrische Ströme erzeugt. Im einfachsten Fall berechnet es sich aus der Summe der Kreisströme in einer langen Spule (Abb.1). In ihrem Inneren liegt es entlang der Achse und hat den Be-

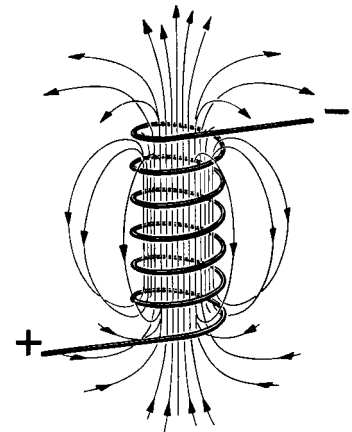


Abbildung 1: Magnetfeld einer Spule.

$$\text{trag } H = \frac{n \cdot I}{L} \quad [H] = \frac{A}{m} \quad (1)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Drahtwindungen,  $L$  die Länge der Spule und  $I$  der durch sie fließende Strom sind. Im Aussenraum ändert sich die Richtung des Magnetfeldes und seine Stärke (sie entspricht der Dichte der Feldlinien) nimmt ab. Magnetische Feldlinien sind stets geschlossen. Wird in eine stromdurchflossene Spule ein Stoff eingebracht, so erhöht sich das Magnetfeld (Gl.1) um die sogenannte Magnetisierung  $M$  dieses Stoffes:

$$H_{\text{tot}} = H + M \quad (2)$$

Wie der Name schon verrät, wird die Magnetisierung eines Stoffes durch das von außen einwirkende Feld beeinflusst:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (3)$$

So dass  $H_{\text{tot}} = (1 + \chi)H$

(4)

Die Grösse  $\chi$  heißt magnetische Suszeptibilität. Mit ihr unterscheidet man

diamagnetische Stoffe	$-1 \leq \chi < 0$	$0 < \mu_r < 1$
paramagnetische Stoffe	$\chi > 0$	$\mu_r > 1$
ferromagnetische Stoffe	$\chi \gg 1$	$\mu_r \gg 1$

Danach gibt es z.B. in einem idealen Diamagnet (Supraleiter,  $\chi = -1$ ) gem. Gln. (2), (3) kein Magnetfeld. Paramagnetische Stoffe verstärken dagegen ein angelegtes äußeres Feld  $H$  und Ferromagnete können es um viele Größenordnungen erhöhen oder auch spontan magnetisiert sein (Permanentmagnet).

# Magnetische Felder, Ferromagnetismus

Die Messung des Magnetfeldes geschieht sehr praktisch durch die Induktion: In einer Drahtschleife wird bei der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes die Induktionsspannung

$$U_{ind} = \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (5)$$

induziert. Dabei ist  $\phi$  der magnetische Fluss durch die Drahtschleife, die den Querschnitt  $A$  hat. Allgemein ist also die magnetische Flussdichte

$$B = \frac{\phi}{A} \quad [B] = \frac{Vs}{m^2} = T \text{ (Tesla)} \quad (6)$$

Den Zusammenhang zwischen Feld und Flussdichte liefert die magnetische Feld-

konstante  $\mu_0 := 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{Vs}{Am} \right]$

$$B = \mu_0 H \quad (7)$$

In Materie wird sinngemäß  $H$  durch  $H_{tot}$  ersetzt, so dass nach Gl.(4)

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H := \mu_0 \mu_r H \quad (8)$$

Die relative Permeabilität  $\mu_r$ , gibt also an, wie weit die magnetischen Eigenschaften eines Stoffes vom Vakuum abweichen. Sie ist für die verschiedenen Stoffkategorien in obiger Tabelle mit angegeben. Durch die unten beschriebene Methode lässt sich sowohl  $B$  als auch  $H$  in einem ferromagnetischen Stoff messen und damit  $\mu_r$  bestimmen. Es zeigt sich, dass  $\mu_r$  sowohl von  $H$  als auch von den früheren Werten von  $H$  abhängt, also eine Hysterese zeigt. Diese Hysterese werden Sie im Versuch untersuchen.

# Magnetische Felder, Ferromagnetismus

## 2.1.2. Prinzip der Messung von B und H

Die direkte Messung der Felder  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  im Inneren von festen Stoffen mittels einer makroskopischen Messsonde ist streng genommen natürlich nicht möglich. Misst man mit einer Feldsonde in Hohlräumen der ferromagnetischen Probe, so muss dabei gesichert sein, dass die Magnetisierungsverteilung und damit der Feldverlauf in der Probe durch die Hohlräume nur geringfügig gestört wird. Die sogenannten Randbedingungen für die Magnetfelder werden im Folgenden auf einen schmalen "Querspalt" und einen schmalen "Längsspalt" angewandt (siehe Abb. 2). Man kann dann die magnetische Flussdichte B und die magnetische Feldstärke H im Material in guter Näherung aus den Feldern in diesen Spalten bestimmen.

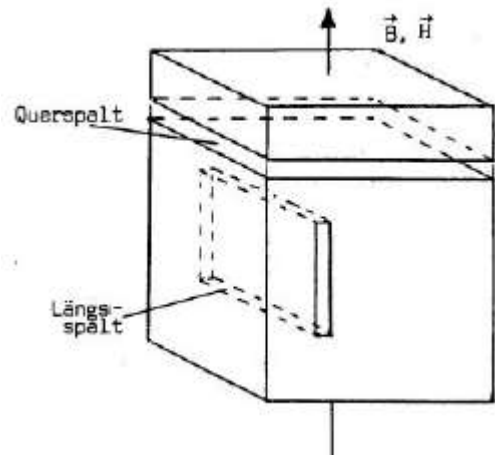


Abbildung 2: Beispiel für einen Querspalt und einen Längsspalt in einem magnetischen Material.

### 2.1.2.1. Querspalt:

Aus den Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik folgt, dass die magnetische Flussdichte  $\vec{B}_L$  in einem Querspalt exakt gleich der Flussdichte  $\vec{B}_E$  im Eisen ist, wenn diese senkrecht zur Spaltebene gerichtet ist (siehe Abb.2) und keine Streufelder am Rand auftreten. Wenn also der Spalt schmal gegen die Ausdehnung des Materials ist, gilt

$$\vec{B}_E = \vec{B}_L \quad (9)$$

Das B-Feld ist also stetig an der Grenzfläche, d. h. es durchdringt einen Querspalt in Materie ohne Änderung des Betrages.

### 2.1.2.2. Längsspalt:

Ebenfalls aus den Maxwell'schen Gleichungen kann man für die Magnetfelder dicht innerhalb bzw. außerhalb von Grenzflächen ableiten, dass gilt

$$\vec{H}_E = \vec{H}_L \cdot \vec{H}_E \text{ und } \vec{H}_L \text{ sind die magnetischen Feldstärken parallel zur Grenzfläche im Eisen bzw. im Luftspalt.}$$

Man sagt: "Die Longitudinalkomponente

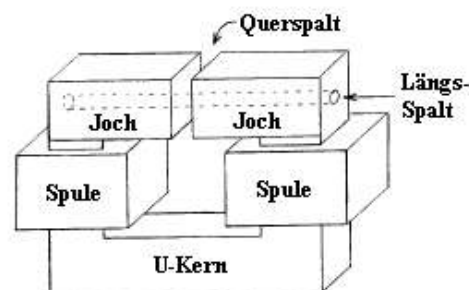


Abbildung 3: Experimentierspulen mit Eisenkern und Jochen.

# Magnetische Felder, Ferromagnetismus

der magnetischen Feldstärke ist an der Grenzfläche stetig." Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}_L$  im Längsspalt kann mit der "longitudinalen Hallsonde" gemessen werden und die magnetische Feldstärke  $H_E$  im Eisen folgt daraus gemäß

$$H_E = H_L = \frac{1}{\mu_0} B_L \quad (10)$$

Quer- und Längsspalt werden im Versuch durch einen variablen Spalt bzw. eine Bohrung in den Jochen des Experimentiertrafos näherungsweise verwirklicht (vgl. Abb. 3).

## 2.1.3. Bemerkungen zum $\vec{H}$ - und $\vec{B}$ -Feld

In der jüngeren Literatur wird die magnetische Flußdichte  $\vec{B}$  häufig als magnetisches Feld oder  $\vec{B}$  -Feld, das  $\vec{H}$  -Feld als Hilfsfeld bezeichnet. Das  $\vec{H}$  -Feld wird durch Gleichung (8) in der Form

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

definiert. Da  $\vec{B}$  immer divergenzfrei ist (es gibt keine magnetischen Ladungen,  $\int \vec{B} d\vec{a} = 0$ , Maxwellgleichungen) muß daher das  $\vec{H}$  -Feld eines homogen magnetisierten Stabes einen Verlauf entsprechende Abb. 4 zeigen: Die  $\vec{B}$  -Feldlinien sind immer geschlossen, das  $\vec{H}$  -Feld muß daher Quellen und Senken an den Stellen, an denen Feldlinien austreten aufweisen. („magnetische Flächenladungsdichte“ des  $\vec{H}$  -Feldes).

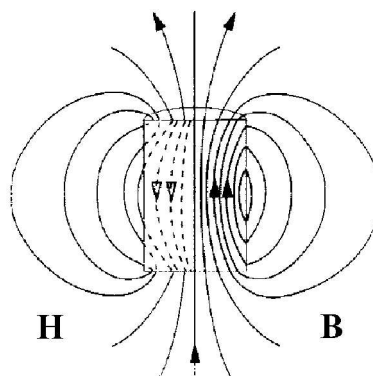


Abbildung 4:  $\vec{H}$  - und  $\vec{B}$  -Felder eines homogen magnetisierten Stabes

Bringt man daher einen Eisenkern in das Feld einer Spule, so entstehen durch die Magnetisierung  $\vec{H}$  - und  $\vec{B}$  -Felder etwa gemäß Abb. 4. Man kann das  $\vec{H}$  -Feld darstellen als eine Zusammensetzung aus einem Spulenfeld  $H_0$  und einem Streufeld

# Magnetische Felder, Ferromagnetismus

$$H_S,$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_S \quad (12)$$

wobei  $\vec{H}_S$  und  $\vec{H}_0$  entlang der Mittellinie antiparallel verlaufen.  $\vec{H}_S$  Wird häufig auch „entmagnetisierendes Feld“ genannt.

Hat das magnetisierbare Material hingegen eine Form, bei der keine H- und B-Feldlinien austreten („Flächenladungsdichte“ des  $\vec{H}$ -Feldes ist Null, „magnetischer Kreis“), so ist

$H_S = 0$  und das  $\vec{H}$ -Feld entspricht dem Spulenfeld. Solche Verhältnisse liegen z. B. vor, wenn das Material die Form eines Ringkerns besitzt und sich im Feld einer Torusspule befindet. Für das Streufeld wird der Ansatz

$$\vec{H}_S = -N_E \cdot \vec{M}$$

gemacht,  $N_E$  heißt Entmagnetisierungsfaktor.  $N_E$  ist i. a. orts- und formabhängig.

Für einen sehr langen Stab oder einen Ringkern gilt  $N_E \rightarrow 0$ , für eine dünne Platte (bzw. sehr kurzem Stab) mit Magnetisierung senkrecht zur Plattenebene  $N_E \rightarrow 1$ .

## 2.1.4. Hysterese

Wird in der Anordnung der Abb. 3 der Spulenstrom  $I$  verändert, ändert sich die magnetische Feldstärke, und auch der magnetische Fluss  $\phi$  bzw. die Flussdichte  $B$  ändern sich. Wegen magnetischer Anisotropien und der unter Umständen komplizierten Dynamik magnetischer Domänen erhält man ein Hystereseverhalten wie in Abb. 5 gezeigt. Bei anfänglich entmagnetisiertem Eisenkern ändert sich  $B$  gemäß der gestrichelten Kurve („Neukurve“). Bei großen  $H$ -Werten wächst  $B$  gemäß  $B = \mu_0 H + M_S$  nur noch langsam. Es sind alle magnetischen Dipole ausgerichtet, so dass  $M = M_S = \text{const.}$ . Man spricht von magnetischer Sättigung. Bei Reduktion von  $H$  folgt  $B$  nicht der Kurve, die es beim Erhöhen von  $H$  einnahm. Der aktuelle Wert  $B(H)$  hängt also von der Vorgeschichte ab.

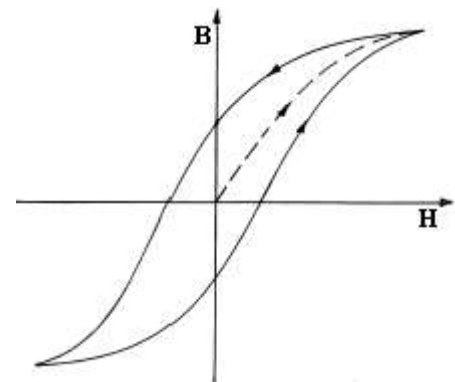


Abbildung 5: typische Hysterese-Schleife eines magnetischen Materials.

## 2.1.5. Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung

2.1.5.1. Machen Sie sich die Einheiten von  $\vec{B}, \vec{H}, \vec{M}, \phi, \mu_0, \mu_r, \vec{j}$  klar.

# Magnetische Felder, Ferromagnetismus

- 2.1.5.2. Leiten Sie die Beziehung zwischen  $\mu$  und  $\chi$  her.
- 2.1.5.3. Beschreiben Sie die Unterschiede von Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus.
- 2.1.5.4. Was sind typische Werte von  $\mu_r$  für magnetische Materialien ?
- 2.1.5.5. Wie groß ist die "differenzielle Permeabilität"  $\frac{\partial B}{\partial H}$ , wenn die Sättigungsmagnetisierung erreicht ist ?
- 2.1.5.6. Skizzieren Sie qualitativ B(H) und M(H) für ferromagnetische Stoffe. Was ist der Unterschied zwischen den beiden Graphen?
- 2.1.5.7. Wie kann man einen ferromagnetischen Körper in einen "entmagnetisierten Zustand" bringen ?
- 2.1.5.8. Was ist ein "Querspalt" und was ein "Längsspalt" ? Wozu verwendet man diese?
- 2.1.5.9. Warum müssen die Spalten zur Messung von  $\vec{B}$  und  $\vec{H}$  in ferromagnetischem Material möglichst eng sein ?
- 2.1.5.10. Erklären Sie die Wirkungsweise einer Hallsonde. Was wird mit ihr gemessen? Wie kann man geometriebedingte Nullfeldsignale vermeiden?
- 2.1.5.11. Wozu benutzt man eine "transversale" bzw. eine "longitudinale" Hallsonde?
- 2.1.5.12. Das Magnetfeld einer langen Zylinderspule fällt zu den Spulenden hin ab. Schätzen Sie anschaulich, ohne zu rechnen, die Grösse des Feldes an den Spulenden im Vergleich zur Feldstärke im Mittelpunkt der Spule ab.
- 2.1.5.13. Geben Sie die Formel für die magnetische Feldstärke H einer Spule als Funktion des Ortes auf der Symmetrieachse an. Stellen Sie diese Abhängigkeit für eine 8 cm lange Spule mit Durchmesser D = 5,5 cm, Windungszahl n = 500 und Stromstärke I = 2,5 A im Intervall  $\pm 7$  cm um die Spulenmitte graphisch dar. (Vergleiche Experiment: "Magnetfeld einer Luftspule")
- 2.1.5.14. Welchen Betrag hat das Erdmagnetfeld?  
Nennen Sie einige Anwendungen für ferromagnetische Stoffe im täglichen Leben.

## **ACHTUNG !**

**Die Hallsonden dürfen nicht verbogen oder geknickt werden !**

**Vor jedem Umbau des Eisenkerns den Erregerstrom am Netzgerät auf Null zurückdrehen, dann erst Netzgerät abschalten.**

**Hallsonde entfernen und in die Stativklemme einspannen !**

# Magnetische Felder, Ferromagnetismus

## 3. Durchführung

Geräte: Feldmessgerät mit Längs- und Querfeldsonde,  
Experimentiertrafo, bestehend aus 2 Spulen je 500 Wdg./2,5 A,  
1 U-Kern aus Weicheisen,  
1 Weicheisen-Joch mit Längsbohrung,  
2 Weicheisen-Polschuhe,  
2 Polschuhe aus Stahl,  
verschiedene Stativmaterialien,  
Steuerbare Stromquelle -5 A bis + 5 A,  
Distanzplättchen verschiedener Dicke mit Schlitz,  
Amperemeter,

### 3.1. Aufgabenstellung

#### 3.1.1. Test der Hallsonden im Erdmagnetfeld

Ermitteln Sie die Richtung des Erdmagnetfelds im Raum mit einer Kompassnadel. Testen Sie die Hallsonden durch Messung des Erdmagnetfelds und stellen Sie dabei den Nullpunkt korrekt ein. Halten Sie dazu die Hallsonden, parallel und antiparallel zum Erdmagnetfeld. Achten Sie darauf, dass sich keine Eisenteile in unmittelbarer Nähe befinden.

#### 3.1.2. Magnetfeld einer Luftspule

Ermitteln Sie die Flußdichte  $B$  und Feldstärke  $H$  einer Luftspule (Länge  $L = 7,2$  cm, Durchmesser  $D = 5.5$  cm, Windungszahl  $N = 500$ ), durch die ein konstanter Strom fließt ( $I = 2.5$  A), auf der Symmetrieachse in Abhängigkeit von der Position (in einem Intervall von  $\pm 7$  cm um die Spulenmitte). Verwenden Sie dazu die longitudinale Hallsonde. Tragen Sie die Messdaten auf mm-Papier auf. Vergleichen Sie den gemessenen Verlauf der Feldstärke graphisch mit der für eine Zylinderspule endlicher Länge (Aufgabe 2.1.5.13)

#### 3.1.3. Magnetfeld einer Spule mit geradem Eisenkern

Setzen Sie nun einen geraden Eisenkern mit Längsbohrung und einem angespitzten Ende in die Spule ein und führen Sie die gleichen Messungen durch wie bei 3.1.2. Tragen Sie die Messpunkte in den Graphen von 3.1.2. ein (im gleichen Massstab, um quantitativ vergleichen zu können). Diskutieren Sie die Veränderung im Feldstärkeverlauf durch Einführung des Eisenkerns mit Hilfe des Hintergrundwissens aus Kap. 2.1.3.

#### 3.1.4. Magnetischer Kreis mit schmalen Luftspalt

Bauen Sie einen magnetischen Kreis mit zwei Spulen à 500 Windungen, einem U-Kern und zwei angespitzten durchbohrten Polschuhen auf ( $d_L = 4$  mm Luftspalt zwischen den flachen Enden der Polschuhe) (vgl. Abb. 3). Achten Sie auf die Polung: Die Felder der



# Magnetische Felder, Ferromagnetismus

Einzelspulen sollen sich gegenseitig verstärken anstatt sich zu kompensieren!

Schliesst man die Spulen besser in Reihe oder parallel ans Netzgerät an ?

Messen Sie die magnetische Feldstärke  $H$  bei fester Stromstärke ( $I = 2.5 \text{ A}$ , in jeder der beiden Spulen) als Funktion des Ortes in der Längsbohrung und einige cm außerhalb der Bohrung. Achten Sie auf die Vorzeichen der von den Feldmessgeräten angezeigten Werte ! Tragen Sie die Messwerte graphisch auf. Diskutieren Sie den gemessenen Verlauf des Feldes längs der Bohrung. Denken Sie dabei an nicht vernachlässigbare Streufelder. Versuchen Sie gegebenenfalls unerwartete Ergebnisse zu interpretieren.

## 3.1.5. Ermittlung der Hysteresekurve eines Eisenkerns / Stahlkerns

Messen Sie die magnetische Feldstärke  $H$  und die magnetische Flussdichte  $B$  in Abhängigkeit vom Spulenstrom  $I$  für einen vollen Ummagnetisierungszyklus, ausgehend von der Sättigung. Verwenden Sie zunächst die Weicheisenkerne, im zweiten Versuchsteil die Stahlkerne. Platzieren Sie dazu die Hallsonden so, dass die Messung am wenigsten durch Streufelder verfälscht wird. Um möglichst weit in die Sättigung zu kommen, können Sie kurzzeitig Spulenströme bis zu  $5 \text{ A}$  zulassen. Achten Sie stets darauf, dass Sie den Strom nur monoton ändern (warum?). Tragen Sie die Messwerte in ein  $B(H)$ -Diagramm ein. Wie unterscheiden sich die Ergebnisse für Weicheisen und Stahl? Warum?