

## **15 Ferro-, Dia-, Paramagnetismus**

Dieser Abschnitt besteht aus zwei Versuchen, die zur Wahl stehen, und im folgenden separat aufgeführt werden:

15.1 Ferromagnetismus

15.2 Dia- und Paramagnetismus

Sprechen Sie die Auswahl bitte rechtzeitig mit Ihren Praktikumpartnern und Ihrem/r Betreuer/in ab.

## 15.1 Ferromagnetismus

Der Ferromagnetismus spielt eine wichtige Rolle in vielen Bereichen der Technik und des täglichen Lebens: vom Transformator, über den Permanentmagneten bis zur Festplatte beruhen viele Effekte auf dem Ferromagnetismus. Dieser Versuch soll einige Einblicke hierin liefern.

### 15.1.1 Stichworte

Hystereseschleife, Bohrsches Magneton, Weissche Bezirke, Barkhausensprünge, Elektronenspin, Hartmagnetische und weichmagnetische Materialien, Ummagnetisierungsverluste, Wirbelströme, Magnetische Kreise.

### 15.1.2 Literatur

NPP: 28; BS-6:Festkörper; Gerthsen; Kittel:Festkörperphysik; Dem-3; Walcher, Geschke.

### 15.1.3 Zubehör

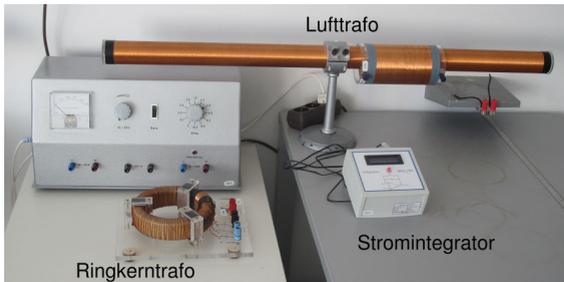


Bild 15.1: Der Versuch »Ferromagnetismus«.

Bild 15.1 zeigt ein Foto des Versuches mit Zubehör: 1 Ringkerntrafo mit 2 Primärwicklungen, sekundär 300 Windungen, 1 Stromintegrator, 1 Lufttransformator mit sekundär ca. 3000 Windungen (genaue Windungszahl bitte der Spulenbeschriftung entnehmen), 1 Wechselschalter, 2 Schalter, 1 Netzgerät (0-10 A, 10-50 V).

### 15.1.4 Grundlagen

#### Wichtige Größen

Im Vakuum ist die magnetische Induktion proportional zur Feldstärke:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad (15.1)$$

aber im materieerfüllten Raum wird dieser Zusammenhang durch die magnetische Suszeptibilität der Materie geändert:

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}, \quad (15.2)$$

was auch über die Magnetisierung  $M$  oder die Polarisation  $J$  geschrieben werden kann als:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \vec{H}(1 + \chi) = \mu_r \mu_0 \vec{H}; \quad (15.3)$$

wobei die relative magnetische Permeabilität  $\mu_r$  und die Suszeptibilität  $\chi$  auch Tensoren zweiter Stufe sein können. Die Magnetisierung ist über die magnetische Suszeptibilität  $\chi$  mit der Feldstärke  $H$  verknüpft:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (15.4)$$

$\chi$  ist dimensionslos. Es gilt weiter für die relative Permeabilität:

$$\mu_r = 1 + \chi. \quad (15.5)$$

### Magnetismus

Magnetismus ist eine grundlegende Eigenschaft aller Elemente. Jedes Element unterliegt einer Form des Magnetismus: Die bekanntesten sind Dia-, Para- oder Ferromagnetismus. Der Grund hierfür kann anschaulich anhand des Bohrschen Atommodells verstanden werden: Die Elektronen des Atoms umlaufen den Kern auf einer Kreisbahn (gilt nicht streng quantenmechanisch!) mit Radius  $r$  mit der Geschwindigkeit  $v$  und können somit als Kreisstrom betrachtet werden. Der Drehimpuls dieses Systems gehorcht der Bedingung  $L = mvr = \hbar$ . Die Elektronen kommen  $v = v/2\pi r$  mal pro Sekunde an jedem Punkt ihrer Bahn vorbei und stellen einen Strom der Größe  $I = e \cdot v = e \cdot v/2\pi r$  und somit ein magnetisches Moment  $p_m = \text{Strom} \cdot \text{Fläche} = e \cdot vr/2$  dar. Somit folgt:

$$\mu_B = p_m = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,2742 \cdot 10^{-24} \frac{\text{Jm}^2}{\text{Vs}}. \quad (15.6)$$

Diese Größe bezeichnet man als BOHRSCHE Magneton, sie ist die Einheit des durch Elektronenumlauf erzeugten magnetischen Moments. Da die Elektronen mit unterschiedlichem Spin den Kern umkreisen, kann man ihnen unterschiedliche magnetische Momente zuweisen. Wenn die Spins einer Schale nicht zu Null koppeln (abgeschlossene Schale), resultiert aus diesem Spin ein magnetisches Moment, das für den Paramagnetismus verantwortlich ist. Eine besondere Form des Paramagnetismus ist der Ferromagnetismus. Als Ferromagnetika bezeichnet man solche Stoffe, die, wenn sie in ein Magnetfeld gebracht werden, auch nach dem Abschalten dieses Feldes eine endliche Magnetisierung beibehalten (Remanenz). Dies ist auf eine Ausrichtung der Elektronen-Spins entlang des Magnetfelds zurückzuführen. Um die Magnetisierung der Probe wieder aufzuheben, muss in diesem Fall ein Magnetfeld umgekehrter Polarität angelegt werden, dessen Feldstärke man als Koerzitivfeldstärke bezeichnet. Zuerst beobachtet wurde dieses Phänomen am Element Eisen (lat. ferrum), woher der Name Ferromagnetismus rührt. Betrachtet man diesen Effekt genauer, so stellt man fest, dass in der Probe bereits vor dem Anlegen eines äußeren Feldes so genannte Weiss'sche Bezirke (Domänen) existieren. Dies sind Bereiche der Probe, in denen die atomaren magnetischen Momente parallel ausgerichtet sind. Bei einer jungfräulichen Probe, die noch nie einem Magnetfeld ausgesetzt worden ist, sind die Magnetisierungsrichtungen dieser Bereiche statistisch verteilt und heben sich makroskopisch auf, so dass die Probe nicht

magnetisch erscheint. Die Grenzen dieser Bezirke bezeichnet man als BLOCH-Wände. Sie haben ihre Ursache in Fehlstellen im Gitter oder in Fremdatomen, die in das Gitter eingebaut worden sind. Legt man nun ein äußeres Feld an, so wachsen zunächst diejenigen WEISSschen Bezirke auf Kosten anderer an, deren magnetische Momente dem äußeren Feldverlauf möglichst parallel liegen. Die Verschiebung der Blochwände erfordert üblicherweise kaum Energie. Erhöht man die äußere Feldstärke, so wachsen nicht nur die Weisssschen Bezirke, sie richten sich nun auch parallel zum äußeren Feld aus. Ab einer gewissen Feldstärke stellt man fest, dass die Magneti-

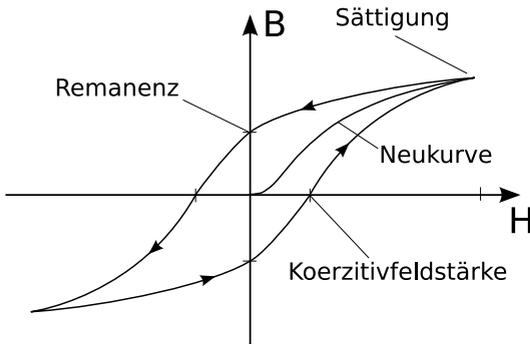


Bild 15.2: Darstellung einer Hysteresekurve: Sättigungsmagnetisierung, Koerzitivfeldstärke und Remanenz sind eingezeichnet.

sierung der Probe kaum noch zunimmt, der Zustand der Sättigungsmagnetisierung ist erreicht, alle magnetischen Momente der Probe sind nun parallel zum Feld ausgerichtet. Nimmt man die äußere Feldstärke nun langsam zurück, dreht sich die Magnetisierungsrichtung der Weisssschen Bezirke wieder in ihre ursprüngliche Richtung, die Verschiebung der Blochwände wird jedoch vorerst nicht rückgängig gemacht. Daher bleibt auch bei nicht vorhandenem äußeren Feld eine Restmagnetisierung übrig. Trägt man  $\vec{B}$ , die Magnetisierung  $\vec{M}$  oder die Polarisation  $\vec{J}$  gegen das äußere Feld  $\vec{H}$  auf, so erhält man die so genannte Hysteresekurve (siehe Bild 15.2).

Die ferromagnetischen Eigenschaften gehen jedoch verloren, wenn eine bestimmte, material-spezifische Temperatur (Curie-Temperatur  $T_C$ ) überschritten wird, das Material wird dann paramagnetisch. Analog zum Curie-Gesetz beim Paramagnetismus  $\chi = \frac{C}{T}$  gilt beim Ferromagnetismus das CURIE-WEISS-Gesetz:

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \quad (15.7)$$

### 15.1.5 Fragen

1. Wie wird die Hystereschleife in diesem Versuch gemessen? Was sind die Vor- und Nachteile des hier angewendeten differentiellen Verfahrens?
2. Woher kommt das magnetische Moment eines Festkörpers?
3. Wie kann man den Barkhausen-Effekt hörbar machen?
4. Welche Bedeutung hat die Fläche, die von der Hysteresekurve eingeschlossen wird?
5. Wie sehen die Hysteresekurven weichmagnetischer und hartmagnetischer Stoffe aus?

### 15.1.6 Weiterführendes

1. Welches andere, elegantere, Verfahren könnte noch zur Messung der Hystereseschleife verwendet werden?

### 15.1.7 Durchführung

Bild 15.3 zeigt den Schaltplan für die Messung der Hystereschleife. Fast alle Teile sind in einem Schaltkasten integriert.

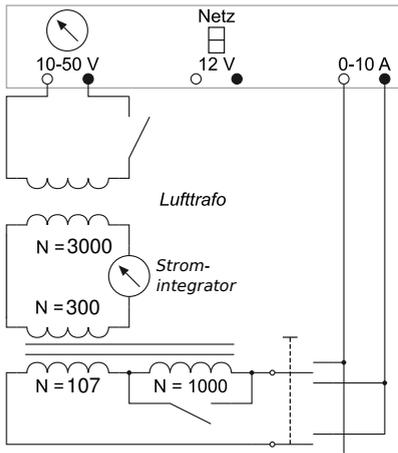


Bild 15.3: Schaltplan für den Versuch »Ferromagnetismus«.

1. Der Stromintegrator (siehe Versuch 11) wird mit Hilfe des Lufttrafos kalibriert. Dabei wird die große Spule des Lufttrafos vom Netzgerät (10 – 50 V) bei mindestens 8 verschiedenen Stromwerten ein- und ausgeschaltet, um eine definierte Änderung des magnetischen Flusses in einer der kleinen Spulen (ausprobieren, welche den nötigen Bereich am besten abdeckt!), die sich im Integratorkreis befindet, zu bewirken. Eine kurze Bedienungsanleitung des Stromintegrators liegt am Versuchsaufbau aus. Die genaue Windungszahl der Sekundärspule des Lufttransformator ist der Spulenbeschriftung zu entnehmen.
2. Vor Beginn der eigentlichen Messung muss die Hysteresekurve einige Male durchlaufen werden, um die magnetische Vorgeschichte des Eisens zu definieren. Man beginnt also die eigentliche Messung im oberen (oder unteren) Sättigungspunkt der Hysterese. Notieren Sie sich die Richtung, in der Sie die Messung starten.
3. Zur Messung wird die Magnetisierung durch Variation der Stromstärke  $I$  in der Spule mit 107 Windungen zwischen  $+10\text{ A}$  und  $-10\text{ A}$  in den vom rechten Drehschalter am Netzgerät vorgegebenen Schritten verändert. Die dabei vom Stromintegrator gemessenen Werte sind zu notieren (auch deren Vorzeichen!). Bei  $\pm 10\text{ A}$  wird zur Erzielung einer möglichst hohen Magnetisierung die Spule mit ca. 1000 Windungen dazu geschaltet (nur für kurze Zeit!). Dies geschieht durch Öffnen des Schalters. Das Zu- und Wegschalten (Schalter schließen) der 1000 Windungen sind natürlich auch jeweils ein Messpunkt.

### 15.1.8 Angaben

- Querschnitt des Ringkerns:  $A_R = 3,01 \times 1,0 \text{ cm}^2$
- Mittlerer Ringdurchmesser:  $D_m = 13,8 \text{ cm}$
- Dichte des Eisens (Armco):  $\rho_{\text{Fe}} = 7,85 \text{ g/cm}^3$
- Molmasse des Eisens:  $M_{\text{Fe}} = 55,85 \text{ g}$ .

### 15.1.9 Auswertung

1. Aus den Werten  $I$  und den Spulendaten berechnen Sie bitte die Werte  $H$ .
2. Mit Hilfe der Eichung der Ladungsmessung berechnen Sie bitte aus den gemessenen Ladungen die Werte  $\Delta B$ .
3. Stellen Sie Magnetisierungskurve grafisch dar. Sie ergibt sich aus der sukzessiven vorzeichenrichtigen Addition der jeweiligen Teilbeiträge.
4. Geben Sie bitte die Werte von Sättigungsmagnetisierung  $B_S$ , Koerzitivfeldstärke  $H_C$  und Remanenz  $B_R$  für den Eisenkern an.
5. Bei der Magnetisierung des Eisens werden  $n$  Elektronen des Eisens pro Volumeneinheit ausgerichtet. Jedes ausgerichtete Elektron trägt mit 1 Bohrschen Magneton  $\mu_B$  zur Magnetisierung bei. Man berechne, wie viele Elektronen pro Eisenatom im Falle der Sättigung ausgerichtet waren. Hierzu sind Volumen und Atomdichte des Eisenkerns zu berechnen.<sup>1</sup>

### 15.1.10 Bemerkungen

Für Durchführung und Auswertung veranschauliche Sie sich bitte nochmals das inkrementelle Verfahren anhand der Hysteresekurve.

Die Zuschaltung der zusätzlichen 1000 Windungen sollte wirklich nur kurz erfolgen, sonst geht das Netzgerät in Überlast und die ganze Messung muss wiederholt werden. Allgemein sollte die Messung zügig durchgeführt werden, vor allem bei hohen Außentemperaturen.

Eisen hat ein atomares magnetisches Moment von  $2,2 \mu_B$ .

---

<sup>1</sup> Achten Sie auf die richtige Größe und vergessen Sie nicht den Vakuumanteil zu berücksichtigen.

## 15.2 Dia- und Paramagnetismus

Der Versuch dient dem Verständnis von magnetischen Eigenschaften von Materialien und deren Messung. Magnetische Eigenschaften von Werkstoffen spielen eine wichtige Rolle im täglichen Leben (z.B. Kreditkarte, Disketten und Festplatten, Magnetbänder, Abschirmungen). Der Versuch führt auch ein in die Anwendungen des Hall-Effektes.

### 15.2.1 Stichworte

Para- und Diamagnetismus, Materie im Magnetfeld, Suszeptibilität, Hall-Sonde, Messung von Magnetfeldern.

### 15.2.2 Literatur

NPP: 28; Walcher; Gerthsen; BS-6:Festkörper, Kittel: Einführung in die Festkörperphysik; Dem-3; Geschke.

### 15.2.3 Zubehör

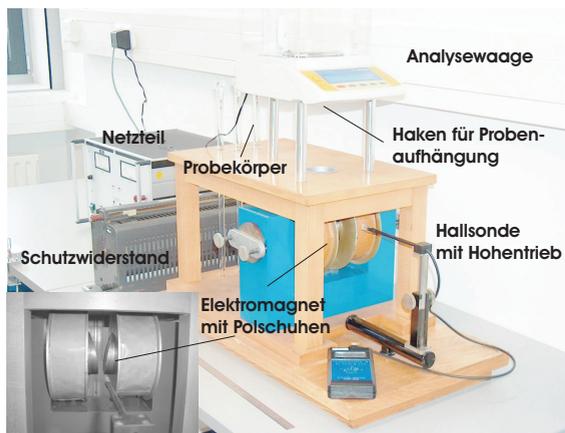


Bild 15.4: Der Versuch »Dia- und Paramagnetismus«. Links unten ist ein Detail der Polschuhe des Magneten zu sehen.

Bild 15.4 zeigt ein Foto des Versuches mit Zubehör: 1 Elektromagnet (Spulen mit Eisenjoch), 1 Analysewaage, 3 Probekörper (Mangan bzw. Tantal, Manganoxid, Wismut), 1 Hall-Sonde in Halterung mit Höhentrieb und Anzeigegerät, 1 Ampèremeter 2 A, 1 Netzgerät (0-220 V, 5 A), 1 Schiebewiderstand (2 A), 1 Multimeter.

### 15.2.4 Grundlagen

#### Theorie

Bringt man Materie in ein Magnetfeld der Feldstärke  $\vec{H}$  ein, so ändert sich die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  infolge der Wechselwirkung des Magnetfeldes mit den Elektronen der Materie. Die

Änderung der magnetischen Flussdichte ist spezifisch für die eingebrachte Substanz. Im Vakuum ist die magnetische Induktion (oder Flussdichte)  $\vec{B}$  proportional zur magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$ :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Vs/Am]} \quad (15.8)$$

In Materie wird dieser Zusammenhang geändert. Die Materie kann entweder multiplikativ durch die Permeabilitätszahl (oder relative Permeabilität)  $\mu_r$  berücksichtigt werden:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H}, \quad (15.9)$$

oder additiv durch die Magnetisierung  $\vec{M}$  (definiert als das magnetische Moment  $\vec{m}$  pro Volumeneinheit  $V$ :  $\vec{M} = \vec{m}/V$ ), bzw. die Polarisation  $\vec{J}$ :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi) = \mu_r \mu_0 \vec{H}; \vec{M} = \chi \vec{H}; \mu_r = (1 + \chi) \quad (15.10)$$

$\chi$  heißt magnetische Suszeptibilität. Neben der magnetischen Suszeptibilität  $\chi$ , benutzt man noch die druckunabhängige spezifische oder Massensuszeptibilität  $\chi/\rho$  und die stoffmengenbezogene oder molare Suszeptibilität  $\chi M/\rho$ . Dabei sind  $\rho$  die Dichte und  $M$  die Mol-Masse.

Eine erste Charakterisierung von Festkörpern beruht auf der Einteilung in *diamagnetische* und *paramagnetische* Stoffe. Erzeugt ein äußeres Magnetfeld eine antiparallele Ausrichtung der Magnetisierung, so ist der Stoff diamagnetisch ( $\chi < 0$ ,  $\mu < 1$ ). Ist die Magnetisierung parallel zum äußeren Feld, ist der Stoff paramagnetisch ( $\chi > 0$ ,  $\mu > 1$ ).

*Diamagnetismus* ist eine Eigenschaft aller Stoffe. Diamagnetisches Verhalten kann nur beobachtet werden, wenn dieses nicht von den anderen Arten des Magnetismus verdeckt wird. Bringt man eine diamagnetische Substanz in ein inhomogenes Magnetfeld ein, so wird sie in Bereiche geringer magnetischer Feldstärke abgedrängt.

Diamagnetisches Verhalten tritt bei Elementen mit abgeschlossenen Elektronenschalen auf. Durch Einbringen einer diamagnetischen Substanz in ein Magnetfeld werden inneratomare Ringströme induziert, die nach der Lenzschen Regel dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet sind. In der Substanz werden also magnetische Dipole induziert, deren Nordpol dem Nordpol und deren Südpol dem Südpol des äußeren Magnetfeldes zugewendet ist. Das magnetische Feld wird dadurch geschwächt, die Substanz aus dem Magnetfeld heraus gedrängt. Die Permeabilitätszahl diamagnetischer Substanzen ist kleiner als eins, die magnetische Suszeptibilität ist negativ. Die Feldvektoren von  $\vec{H}$  und  $\vec{M}$  sind einander entgegengerichtet. Die Dichte der Feldlinien ist im Material geringer als außerhalb. Der Diamagnetismus ist nahezu temperaturunabhängig.

Substanzen mit diamagnetischem Verhalten ( $\mu_r < 1$ ) sind:  $\text{H}_2\text{O}$ , Cu, Bi, Au, Ag,  $\text{H}_2$ .

*Paramagnetismus* liegt vor, wenn unkompenzierte magnetische Momente der Elektronen auftreten. Dies ist der Fall, wenn die Elektronenschalen der Atome nicht vollständig aufgefüllt sind. Im äußeren Magnetfeld werden die ursprünglich zufällig orientierten magnetischen Momente ausgerichtet. Die Permeabilitätszahl paramagnetischer Substanzen ist größer als eins, die magnetische Suszeptibilität ist positiv. Die Feldvektoren von  $\vec{H}$  und  $\vec{M}$  sind gleichgerichtet. Die Dichte der Feldlinien ist im Material größer als außerhalb. Das Curiesche Gesetz beschreibt die Abhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität von der absoluten Temperatur für den Parama-

gnetismus:

$$\chi = \frac{C}{T}. \quad (15.11)$$

Die Curie-Konstante  $C$  ist eine materialabhängige Größe. Substanzen mit paramagnetischem Verhalten sind: Al, O, W, Pt, Sn.

Die magnetostatische Energie des Festkörpers mit Volumen  $V$  im Magnetfeld beträgt:

$$W = -\frac{1}{2} \int_V \vec{H} \cdot d\vec{B} = -\frac{1}{2} V (\mu_0 H + J) H = -\frac{1}{2} V \chi \mu_0 H^2 - \frac{1}{2} V \mu_0 H^2, \quad (15.12)$$

wobei der mittlere Term vereinfachende Annahmen enthält ( $\chi$  konstant, kleines  $V$  usw.) und der letzte Term die Vakuumenergie wiedergibt. Das Magnetfeld  $H$  kann ohne Fehler durch die Induktion  $B = \mu_0 H$  ersetzt werden. Die Kraft, die auf den Festkörper wirkt, ist der negative Gradient der Energie, in unserem vereinfachten eindimensionalen Fall (die Vakuumenergie verschwindet) also:

$$F_x = -\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{V \chi}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial x} \quad (15.13)$$

Eine Kraftwirkung entsteht also nur durch ein inhomogenes Magnetfeld. Diamagnetische Körper ( $\chi < 0$ ) werden in Richtung kleinerer Feldstärken gedrängt, paramagnetische in Richtung größerer Feldstärke.

*Hall-Effekt:* Durch ein leitendes Plättchen mit der Breite  $b$  und der Dicke  $d$  fließt in  $x$ -Richtung ein Strom  $I$  mit der Stromdichte  $j_x = nev_x$ , wobei  $n$  die Elektronendichte,  $v_x$  die Driftgeschwindigkeit und  $e$  die Elementarladung bedeuten. Dies ist in Bild 15.5 nochmals veranschaulicht. Auf

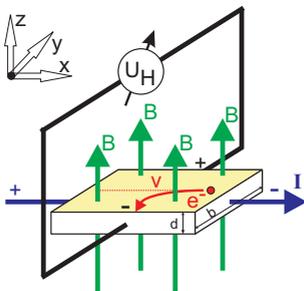


Bild 15.5: Prinzipskizze des Hall-Effektes.

die Elektronen wirkt in einem zur Leiterebene transversalen Magnetfeld  $B_z$  eine Lorentz-Kraft:

$$F_L = -ev_x B_z \quad (15.14)$$

Diese Kraft lenkt die Elektronen senkrecht zur ursprünglichen Stromrichtung und senkrecht zur Richtung der transversalen magnetischen Flussdichte ab. Zwischen den Punkten A und B entsteht

eine Potenzialdifferenz (Hall-Spannung)  $U_H$ :

$$U_H = B_z v_x b = \frac{1}{n \cdot e} j_x B_z b = R_H j_x B_z b. \quad (15.15)$$

Der Hall-Koeffizient (oder Hall-Widerstand) ist dabei  $R_H = \frac{1}{n \cdot e}$ , welcher auch benutzt werden kann um die Ladungsträgerdichte  $n$  zu bestimmen. In Hall-Sonden verwendet man meist Halbleiter-Materialien, da die Ladungsträgerdichte  $n$  gering und damit die Hall-Spannung hoch ist.

### Versuchsaufbau

Die Schaltung und der prinzipielle Aufbau des Versuches sind in Bild 15.6 dargestellt. Das inho-

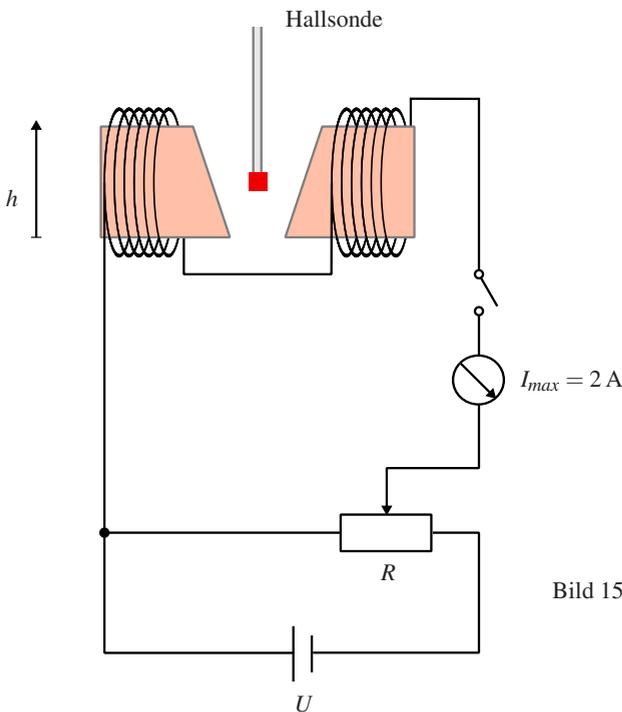


Bild 15.6: Schaltung zur Messung der Suszeptibilität von para- und diamagnetischen Körpern. Die Hall-Sonde befindet sich zur Messung zwischen den Polschuhen (Ansicht von oben).

mogene Magnetfeld wird durch Elektromagnete mit abgeschrägten Polschuhen erzeugt.<sup>2</sup>

Zum Ausmessen des Magnetfeldes wird im Versuch der Siemens Hall-Sensor KSY44 verwendet. Er besteht aus einkristallinem GaAs, welches durch MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) hergestellt wurde. Der Chip hat eine Fläche von  $0,35 \times 0,35 \text{ mm}^2$ , eine Dicke von  $0,28 \text{ mm}$  und ist in ein dünnes Plastikgehäuse eingebaut. Der Nominalstrom beträgt  $7 \text{ mA}$ . Die Sensitivität liegt im Bereich von  $1,0\text{-}1,8 \text{ V/T}$ .

<sup>2</sup> Das Feld kann auch berechnet werden aus: Geometrischen Abmessungen, Material der Polschuhe, Abmessungen, Spule: Windungen, Strom.

### 15.2.5 Fragen

1. Welche Stoffe sind diamagnetisch, welche paramagnetisch, wodurch unterscheiden sie sich?
2. Wie erzeuge ich ein inhomogenes Magnetfeld, wie ein homogenes?
3. Wie funktioniert die Hall-Sonde?
4. Misst man mit der Hallsonde das Magnetfeld oder die Induktion?

### 15.2.6 Weiterführendes

1. Welche wichtige Größe der Halbleiterphysik kann man mit dem Hall-Effekt noch bestimmen?
2. Welche anderen Methoden gibt es zur Messung von Magnetfeldern?
3. Man kann das Magnetfeld für den Versuch auch berechnen. Wie?

### 15.2.7 Durchführung

1. Die Wicklungen des Elektromagneten werden über das Ampèremeter und den Schiebewiderstand an den 220 V Ausgang des Gleichspannungs-Netzteiles gelegt. Die Stromstärke im Elektromagneten sollte etwa 1,2 A betragen, bei Netzschwankungen bitte laufend nachregeln. Den Spulenstrom  $I_{sp}$  bitte notieren.
2. Ausmessen des Magnetfeldes in dem Bereich der Probekörper von oberhalb bis unterhalb der Eisenkerne. Es wird bei schrittweiser Änderung der Höheneinstellung mit der Hall-Sonde die magnetische Induktion  $B(h)$  gemessen. Die Schrittweite sollte dabei 5 mm nicht überschreiten.
3. Notieren Sie die Massen der verwendeten Körper (mit Benennung, z.B. B2).
4. Ungefähre Festlegung des Ortes der Probekörper (Bi sollte sich im unteren Drittel,  $MnO_2$  im oberen Drittel des Magnetfeldes befinden).
5. Genaue Festlegung des Ortes der Probekörper während der Kraftmessung. Dazu werden mehrere Ablesungen am Höhentrieb der Hall-Sonde gemacht (mindestens 3 Bestimmungen).
6. Messung der Kräfte auf die Probekörper (mit und ohne Magnetfeld) mit der Analysewaage. Die Probe soll dabei frei zwischen den Polschuhen hängen. Für jeden Probekörper sind mindestens 3 Messungen (mit und ohne Magnetfeld) durchzuführen.
7. Ausmessung des Magnetfeldes für vier verschiedene Stromstärken (0,8, 1,0, 1,2, 1,4 A). Dabei genügt es hier das Magnetfeld am Ort des Mangan-Probekörpers und an zwei Punkten darüber und zwei Punkten darunter zu messen (jeweils in 5 mm Schritten). Also 5 Messungen für jede Stromstärke.
8. Messung der Kräfte auf den Mangan-Probekörper (mit und ohne Magnetfeld) mit der Analysewaage für die vier Stromstärken (0,8, 1,0, 1,2, 1,4 A). Die Probe soll dabei frei zwischen den Polschuhen hängen. Für jede Stromstärke sind mindestens 3 Messungen (mit und ohne Magnetfeld) durchzuführen.

9. (Für Versierte) Messen Sie bitte den Abstand der Polschuhe als Funktion der Höhe (5 Punkte reichen).

### 15.2.8 Angaben

Die zur Auswertung benötigten Dichten sind in Tabelle 15.1 angegeben.

Tabelle 15.1: Dichten der verwendeten Materialien.

Material	Zeichen	$\rho$ [g cm <sup>-3</sup> ]
Mangandioxid	MnO <sub>2</sub>	5,0
Mangan	Mn	7,2
Tantal	Ta	16,6
Wismut	Bi	9,8

### 15.2.9 Auswertung

1. Der gemessene Ortsverlauf der Flussdichte  $B(h)$  ist zu zeichnen (Millimeterpapier oder Computer).
2. Die Flussdichte  $B$  und deren Gradient  $\partial B(h)/\partial h$  am Ort der Proben können aus der Zeichnung entnommen werden. (Es sind die Werte für die jeweilige Messposition anzugeben und zu verwenden).
3. Zeichnen Sie bitte das Produkt  $B \frac{\partial B}{\partial h}(h)$  als Funktion von  $h$ . Was fällt Ihnen auf?
4. Berechnen Sie bitte die Kräfte auf die Probekörper und geben Sie sie in der Einheit [N] (Newton) an.
5. Die spezifische magnetische Suszeptibilität und magnetische Suszeptibilität von Mangan bzw. Tantal, Mangandioxid und Wismut sind zu bestimmen.
6. Für die verschiedenen Stromstärken ist  $B$  und sein Gradient zu bestimmen. Was lässt sich beobachten und was war zu erwarten?
7. Tragen Sie die Kraft  $F_x$  auf den Probekörper als Funktion der Stromstärke auf. Berechnen Sie unter Ausnutzung des Ergebnisses aus 3. den Zusammenhang zwischen  $I$  und  $B$  ( $B = f(I)$ ). Lässt sich dies verifizieren?

### 15.2.10 Bemerkungen

Erläuterung der Bedienung der Analysewaage durch den Assistenten. Probekörper bitte vorsichtig in den Haken unter der Analysewaage einhängen.