

# Magnetfeldmessungen (P1-80)

Daniel Wolf, Paul Schnäbele (Mo-30)

4.11.09

## Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Vorbereitung</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Vorbereitung (Paul Schnäbele)</b>	<b>3</b>
1.1	Einleitung . . . . .	3
1.2	Klassifikation der Materialien . . . . .	3
1.2.1	Diamagnetische Materialien . . . . .	3
1.2.2	Paramagnetische Materialien . . . . .	4
1.2.3	Ferromagnetische Materialien . . . . .	4
1.3	Aufgabe 1 . . . . .	5
1.3.1	Entmagnetisierung des Kerns . . . . .	5
1.3.2	Induktiver Widerstand . . . . .	6
1.3.3	Messung mit Spalt . . . . .	7
1.3.4	Bestimmung der Induktivität und der Permeabilität . . . . .	7
1.4	Aufgabe 2: B(H)-Kurve . . . . .	7
1.4.1	Ausmessung von $\vec{B}$ -Feldern mit Hilfe des Halleffekts . . . . .	7
1.4.2	Bestimmung der Hysterese-Kurven . . . . .	8
1.5	Aufgabe 3: Zylinderspule . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Vorbereitung (Daniel Wolf)</b>	<b>9</b>
2.1	Aufgabe 1 . . . . .	9
2.1.1	Entmagnetisieren des Kerns . . . . .	9
2.1.2	Messen des induktive Widerstands . . . . .	10
2.1.3	Messen mit Luftspalt . . . . .	10

2.2	Aufgabe 2 . . . . .	11
2.2.1	B(I) / B(H) Kurven samt jungfräulicher Kurve . . . . .	11
2.2.2	Bis zu $\pm 1,2A$ messen . . . . .	12
2.3	Magnetische Feldstärke in zylindrischen Luftspulen . . . . .	12
2.3.1	Eichen einer Longitudialfeld-Hallsonde . . . . .	12
2.3.2	Magnetfeld entlang der Achse . . . . .	13
2.4	Demonstrationsversuch für dia-, para- und ferromagnetische Körper . . . . .	13

**II Quellenverzeichnis 14**

## Teil I

# Vorbereitung

## 1 Vorbereitung (Paul Schnäbele)

### 1.1 Einleitung

Zunächst gehe ich auf theoretische Grundlagen zur Klassifikation der magnetischen Materialien ein. Diese Einleitung bereitet zugleich den Demonstrationsversuch am Ende vor. Außerdem soll hier vorab - also bevor einzelne Aufgaben erarbeitet werden - die Hysteresekurve besprochen werden.

### 1.2 Klassifikation der Materialien

#### 1.2.1 Diamagnetische Materialien

Bringt man einen diamagnetischen Stoff in ein Magnetfeld, so werden im Material magnetische Dipole erzeugt, die die Wirkung des Feldes abschwächen. D. h., dass ein solches Material die Tendenz hat, aus Gebieten hoher Feldstärke herauszuwandern. Wird der Stoff im Material gehalten, so wird das resultierende  $\vec{B}$ -Feld kleiner. Solche Stoffe werden also durch ein Verhalten charakterisiert, das man (aufgrund von Schulwissen bzw. Intuition) nicht vermuten würde. Bekannt ist generell die Tatsache, dass sich z. B. ein Weicheisenkern in einer stromdurchflossenen Spule magnetisiert und somit das Magnetfeld verstärkt (s. unten).

Aus Lernblättern zur Experimentalphysik II geht hervor:

$$\vec{M} = (\mu - 1) \cdot \vec{H} = \chi_m \cdot \vec{H} \quad (1)$$

Dabei ist  $\vec{M}$  die Magnetisierung und  $\chi_m := \mu - 1$  die magnetische Suszeptibilität. Die Permeabilität  $\mu$  des jeweiligen Materials ist dimensionslos. Unter der Magnetisierung kann man sich anschaulich die Dichte an magnetischen Dipolen im Material vorstellen. Sie ist also ein Maß dafür, was mit dem Stoff bei anliegendem Magnetfeld passiert: Werden Dipole induziert? Wenn ja, verstärken oder schwächen sie das Magnetfeld? Die Permeabilität von Luft können wir als eins annehmen.

Für diamagnetische Materialien folgt, dass die Permeabilität kleiner als 1 ist, sodass die magnetische Suszeptibilität negativ wird und die Magnetisierung der magnetischen Feldstärke entgegen gerichtet ist. Die Abweichungen von 1 sind allerdings äußerst gering. Diamagnetismus tritt bei Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern auf. Die Permeabilität ist hier unabhängig von der Temperatur und  $\vec{H}$ .

### 1.2.2 Paramagnetische Materialien

Beim Paramagnetismus weicht  $\mu$  ebenfalls nur minimal von 1 ab und ist weiterhin unabhängig von der angelegten magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$ . Allerdings gilt hier stets  $\mu > 1$  und die Permeabilität ist auch temperaturabhängig.

### 1.2.3 Ferromagnetische Materialien

Hier kann  $\mu$  sehr große Werte annehmen, die nun vom Feld und der Temperatur abhängig sind. Ferromagnetismus tritt z. B. bei Eisen, Kobalt und Nickel auf und ist eine typische Festkörpereigenschaft. Solche Materialien lassen sich also magnetisieren und verstärken dadurch das anliegende Feld. Anschaulich kann man sich vorstellen, dass die „Elementarmagnete“<sup>1</sup> im Stoff einheitlich(er) ausgerichtet werden, sodass sich die Addition ihrer vielen magnetischen Felder nicht mehr aufhebt, sondern ein Gesamtfeld bleibt, welches das äußere Feld verstärkt. Die unzähligen Elementarmagnete werden also ausgerichtet.

Charakteristisch für Ferromagneten ist die sogenannte **Hystereseschleife**:

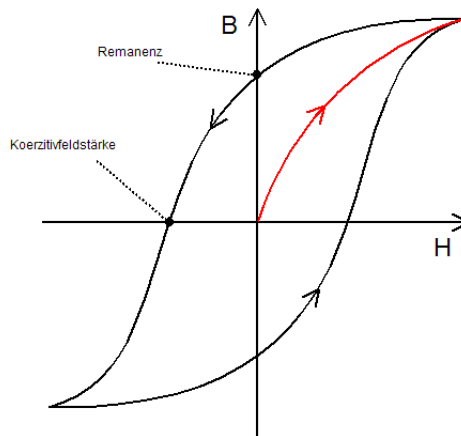


Abbildung 1: Hystereseschleife, Quelle: [www.chemgapedia.de](http://www.chemgapedia.de)

Das Ziel soll es sein, den Zusammenhang zwischen B und H festzustellen. Hierfür eignet sich die in Abb. 2 dargestellte Versuchsanordnung. H ist der Betrag der magnetischen Feldstärke und charakterisiert somit - unabhängig von der Magnetisierung im Eisenkern<sup>2</sup> - das Magnetfeld. Schließlich ist  $\vec{H}$  in Materie und Vakuum gleich.

Bei Veränderung des Stroms durch die Primärspule P, ändert sich auch H, wobei gilt:  $\Delta I \sim \Delta H$ . Der messbare Spannungsstoß  $\int U_{ind} dt$  ist wiederum proportional zur Veränderung von B ( $\int U_{ind} dt \sim \Delta B$ ). Schließlich wird bei Änderung der magnetischen Flussdichte

<sup>1</sup>Ein vereinfachtes Modell der Materie könnte z. B. so aussehen: Um einen Atomkern kreisen Elektronen und stellen bewegte Ladung dar. Demzufolge fungieren alle diese Einheiten als kleine Magnete („Elementarmagnete“).

<sup>2</sup>Es gibt einen Eisen-U-Kern, auf den die Spulen gesteckt werden können. Danach kann der Eisenkern mit einem Joch geschlossen werden.

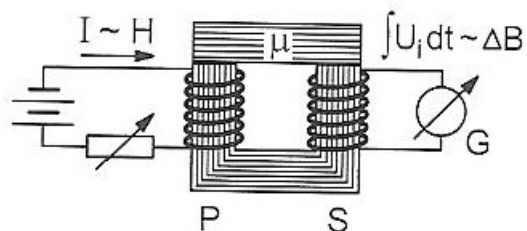


Abbildung 2: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Hysteresekurve

eine Spannung induziert. Hierbei ist die Magnetisierung des Ferromagneten miteinbezogen! Daraus ergibt sich die in Abb. 1 dargestellte Hystereseschleife.

Führt man den Strom nach oben, so beobachtet man, wie das  $\vec{B}$ -Feld auf der Neukurve (rot) ansteigt. Bei Verringerung der Stromstärke stellt man bei  $H=0$  fest, dass eine gewisse remanente Flussdichte  $B_r$  (**Remanenz**) bleibt. Der Stoff wurde also zum Permanentmagneten! Entmagnetisieren ließe er sich z. B. durch Erhitzen oder mechanische Erschütterungen. Stellt man nun eine Feldstärke „in die andere Richtung“ ein, so verschwindet bei der sogenannten **Koerzitivfeldstärke**  $H_c$  schließlich die magnetische Flussdichte. Aus dem Schaubild erschließt sich der weitere Verlauf der Hysteresekurve. Die Neukurve wird kein zweites Mal durchlaufen.

Die Fläche unter der Hysteresekurve gibt die elektrische Energie an, die bei einem Umlauf in Wärme umgewandelt wird.

## 1.3 Aufgabe 1

### 1.3.1 Entmagnetisierung des Kerns

Später wird es nötig sein, zu wissen, wie man einen Ferromagneten entmagnetisieren kann. Erhitzen kommt nicht in Frage. Allerdings ist es möglich, das Wissen zur Hystereseschleife zu nutzen. Fließt ein Wechselstrom durch die Primärspule in obiger Versuchsanordnung (Abb. 2), so wird die Hystereseschleife ständig durchlaufen. Dreht man nun die Stromstärke (Amplitudenwert) nun langsam zurück so wird die Hystereseschleife immer enger und kleiner. Deswegen bleibt am Ende eine Remanenz, die wir als sehr gering annehmen können. Der Versuch wird durch folgendes Schaubild dargestellt.

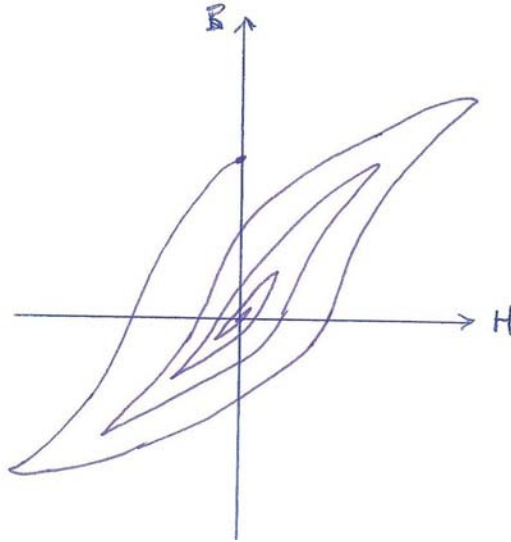


Abbildung 3: Entmagnetisierung

Der Erfolg der Entmagnetisierung kann mit Hilfe von Eisenspänen, eines Kompasses oder einer Hall-Sonde überprüft werden.

### 1.3.2 Induktiver Widerstand

Es soll der induktive Widerstand  $X_L$  der beiden Spulen bestimmt werden. Für ihn kennen wir die Formel:  $X_L = \omega L$ . Rechnet man im Komplexen<sup>3</sup>, so vereinfacht sich vieles. Die Gesamtimpedanz ergibt sich zu:

$$\tilde{Z}_{ges} = R_L + i(X_L - X_C) \quad (2)$$

Allerdings gibt es hier keinen kapazitiven Widerstand. Wir können dann durch Bilden des Betrages wieder zu reellen und damit physikalisch sinnvollen Größen übergehen. Man erhält:

$$Z_{ges} = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (3)$$

Wir müssen also  $Z_{ges}$  und dem Ohmschen Widerstand  $R_L$  der Spule messen. Dazu nutzen wir den in Abbildung 4 gezeigten Versuchsaufbau. Es wird eine spannungsrichtige Schaltung verwendet. Das bedeutet, dass die Spannung „korrekt“ gemessen wird, das Amperemeter also nicht parallel zum Voltmeter geschaltet ist. Über die - auch bei Wechselspannung gültige - Beziehung  $Z = \frac{U}{I}$  erhalten wir zunächst die Gesamtimpedanz  $Z_{ges}$ . Dabei liegt Wechselspannung an. Danach legen wir Gleichspannung an, um den Ohmschen Widerstand der Spule bestimmen zu können.

Somit erhalten wir letztlich:

$$X_L = \sqrt{Z_{ges}^2 - R_L^2} \quad (4)$$

<sup>3</sup>Wird hier mit einer Schlange (̂) über den Formelsymbolen verdeutlicht.

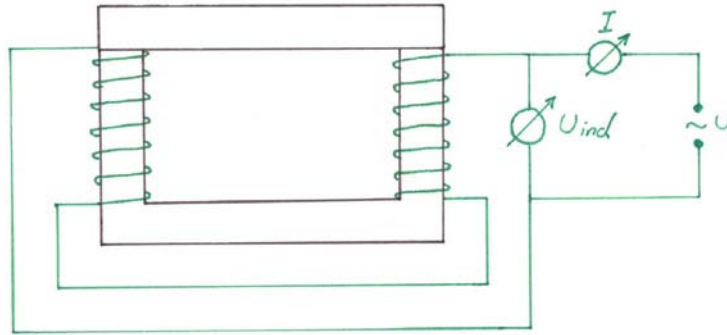


Abbildung 4: Aufbau zur Bestimmung von  $X_L$

Dieser induktive Widerstand soll in Abhängigkeit vom Strom gemessen werden. Allerdings weist er keine Abhängigkeit vom Strom auf! Er ist lediglich von der Induktivität und der Frequenz abhängig. Deswegen erwarten wir eine Gerade als Messergebnis.

### 1.3.3 Messung mit Spalt

Es wird nun ein Spalt in den - durch das Joch - geschlossenen Eisenkern eingefügt. Der Spalt wird durch ein nicht-ferromagnetisches Material ausgefüllt. Die gleichen Messungen werden wiederholt.

### 1.3.4 Bestimmung der Induktivität und der Permeabilität<sup>4</sup>

Für die Induktivität einer langen, dünnen Spule mit  $n$  Windungen ist folgende Formel bekannt:

$$L = \mu \mu_0 n^2 \frac{A}{l} \quad (5)$$

Dabei ist  $l$  die Länge der Spule und  $A$  ihr Querschnitt. Weiterhin kann über  $X_L = \omega L$  die Induktivität bestimmt werden, da  $X_L$  experimentell ermittelt wird.

Die Permeabilität erhält man nun durch Umstellen von (5) und Einsetzen des ermittelten Wertes für  $L$ .

$$\mu = \frac{l L}{\mu_0 n^2 A}$$

## 1.4 Aufgabe 2: B(H)-Kurve

### 1.4.1 Ausmessung von $\vec{B}$ -Feldern mit Hilfe des Halleffekts

Eine **Hallsonde** nutzt den Hall-Effekt, um das Ausmessen von magnetischen Feldern zu ermöglichen. Fließt ein Strom durch ein Leiterplättchen, das sich in einem  $\vec{B}$ -Feld befindet,

<sup>4</sup>Mit Permeabilität ist hier das gleiche wie „relative Permeabilität“ auf dem Aufgabenblatt gemeint - also ohne  $\mu_0$ .

so wirkt die Lorentz-Kraft auf die Ladungsträger und ein elektrisches Feld baut sich auf. Die Ladungstrennung kommt zum Stillstand, wenn ein Kräftegleichgewicht erreicht wird. Die erzeugte Hallspannung  $U_H$  lässt sich messen und über folgende Formel auch rechnerisch ermitteln:

$$U_H = \frac{1}{n e} \frac{I_s B}{d} = K_H \frac{I_s B}{d} \iff B = \frac{U_H d}{K_H I_s} \quad (6)$$

Dabei ist:

- $n$  die Anzahldichte
- $d$  die Tiefe (Seitenlänge des Messplättchens in der Sonde, welches längs zum Magnetfeld ausgerichtet ist)
- $K_H = \frac{1}{n q}$  die Hallkonstante (wobei hier:  $q=e$ )
- $I_s$  der Strom durch das Messplättchen in der Hallsonde.

Mit einem solchen Messgerät ist nun also die Messung von magnetischen Flussdichten möglich, was im Folgenden benötigt werden wird.

#### 1.4.2 Bestimmung der Hysterese-Kurven

Unter „Klassifikation der Materialien“ wurde bereits Grundsätzliches zur Hysteresekurve erläutert. Nun sollen zwei  $B(H)$ -Kurven ermittelt werden (s. dazu Angaben auf Aufgabenblatt). Allerdings wird nicht der Versuchsaufbau verwendet, welcher oben skizziert wurde. Es bleibt hier beim Aufbau, der bereits in der ersten Aufgabe verwendet wurde, da eine Hallsonde zur Messung der magnetische Flussdichten verwendet wird. Diese Sonde wird in den Spalt eingeführt.

Zunächst wird ein Zusammenhang zwischen  $B$  und Spulenstrom  $I$  experimentell festgehalten. Dies muss dann noch umgerechnet werden, damit die  $B(H)$ -Kurve ermittelt werden kann. Dabei hilft uns das Amperesche Gesetz (Maxwell-Gleichung). Wir nehmen an, dass das  $\vec{B}$ -Feld stetig ist und sich im Spalt somit nicht verändert. Damit ergibt sich:

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = H_S d + H_E l = n I \quad (7)$$

Dabei steht der Index „S“ für Spalt und der Index „E“ für Eisen. Außerdem:

- $d$  ist die Spaltbreite und  $H_S$  die Magnetfeldstärke im Spalt
- $l$  ist die „Feldlinienlänge“ im Eisen
- Windungszahl  $n$

Man weiß, dass  $B_E = B_S$  gelten muss, sodass gefolgert werden kann:

$$B_E = \mu_E \mu_0 H_E = \mu_{Luft} \mu_0 H_S = B_S \iff H_S = \mu_E H_E$$

Setzt man das oben ein, so ergibt sich:  $H_E = \frac{n I}{\mu_E d + l}$

Jetzt kann für jeden  $I$ -Wert ein passender  $H$ -Wert errechnet werden.



## 1.5 Aufgabe 3: Zylinderspule

Mit Hilfe des Biot-Savart-Gesetzes lässt sich eine Formel für das Magnetfeld einer Zylinderspule (Solenoid) auf der Mittelachse herleiten (Lernblätter, Exp II):

$$B = \frac{\mu_0 I N}{2 l} \left( \frac{\frac{l}{2} - x}{\sqrt{R^2 + (\frac{l}{2} - x)^2}} + \frac{\frac{l}{2} + x}{\sqrt{R^2 + (\frac{l}{2} + x)^2}} \right)$$

Dabei ist:

- $l$  die Länge der Spule
- $N$  die Anzahl der Windungen
- der Mittelpunkt der  $x$ -Achse in der Mitte der Spule
- $I$  der Strom, der durch die Spule fließt

Es lässt sich somit feststellen, dass die Feldstärke auf der Achse z. B. am Spulenrand noch gerade halb so groß wie in der Mitte ist. Im folgenden Versuch soll das Magnetfeld einer Spule untersucht werden, die nicht mehr als lang (gegenüber ihrem Durchmesser) angesehen werden kann.

Dazu wird wieder eine Hallsonde verwendet, die wir zunächst eichen. Bekannt ist:  $B = \frac{U_H d}{K_H I_s} = \text{const} \cdot U_H$

Die Konstante können wir bestimmen, indem wir das Minimum lokalisieren (hier ist bei  $I=0,96\text{A}$  die magnetische Flussdichte durch  $10\text{mT}$  gegeben). Damit wäre die Hallsonde geeicht, sodass das Magnetfeld ausgemessen werden kann.

## 2 Vorbereitung (Daniel Wolf)

### 2.1 Aufgabe 1

#### 2.1.1 Entmagnetisieren des Kerns

Legt man einen ferromagnetischen Eisenkern in ein Magnetfeld, so richten sich seine Weißschen Bezirke entlang des Feldes aus. Entfernt man anschließend den Kern aus dem Magnetfeld, so enthält er eine Restmagnetisierung, Remanenz genannt. Um diese aufzuheben, kann man entweder den Eisenkern erhitzen, oder man bringt den Kern in eine Spule, die von Wechselstrom durchflossen wird. Somit ändert sich die Orientierung der Bezirke laufend. Fährt man nun den Spulenstrom langsam gegen Null, so ist der Eisenkern nahezu entmagnetisiert. Dies kann man sich mithilfe der Hysteresis Kurve veranschaulichen (Abb. 3). Man kann dies mithilfe eines Kompasses, Hallsonde oder einfachen magnetischen Gegenständen überprüfen.

### 2.1.2 Messen des induktive Widerstands

Wir schalten 2 Spulen in Reihe und verbinden sie mit einem geschlossenen Eisenkern (Abb. 2). Anschließend lassen wir sie zuerst von Gleichstrom und anschließend Wechselstrom durchfließen.

Gemessen wird die Impedanz der Spule mit einer Spannungsrichtigen Schaltung (Abb. 4). Für diese wird das Voltmeter direkt an den zu Messenden Widerstand angeschlossen. Das Strommessgerät misst somit sowohl die Ströme, die durch den Widerstand selbst, als auch durch das Voltmeter fließen. Dies dürfte allerdings keine größeren Messfehler liefern, da der ohmsche Widerstand einer Spule sehr klein ist, ein gutes Voltmeter jedoch einen sehr großen Widerstand besitzt. Deshalb wird der meiste Strom auch durch den Spulenwiderstand fließen. Für Wechselstrom ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \underline{u}_{AC} &= -L\dot{\underline{i}} = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} \\ \underline{i} &= - \int \frac{\hat{u}}{L} e^{j\omega t} \cdot dt \\ \underline{i} &= \frac{\hat{u}}{j\omega L} e^{j\omega t} \Rightarrow \hat{i} = \frac{\hat{u}}{j\omega L} \\ \Rightarrow \underline{x}_{l,Theo} &= \frac{\hat{u}}{\hat{i}} = j\omega L \end{aligned} \tag{8}$$

Da wir jedoch eine reale Spule betrachten hat sie auch noch einen ohmschen Widerstand. Den Widerstand der Spule messen wir, indem wir eine Gleichstromspannung an die Spule anlegen. Nach dem ohmschen Gesetz gilt:

$$R_{\Omega} = \frac{U_{DC}}{I_{DC}}$$

Somit ergibt sich die gesamt Impedanz

$$\underline{Z} = R_{\Omega} + \underline{x}_l$$

Dieses  $|\underline{Z}|$  werden wir also messen, wenn wir Wechselspannung anlegen.

Umgestellt auf  $x_l$  ergibt sich:

$$x_l = \sqrt{Z^2 - R_{\Omega}^2} = \omega L \Rightarrow L = \frac{x_l}{\omega}$$

### 2.1.3 Messen mit Luftspalt

Durch die Definition von L können wir  $\mu_r$  berechnen:

$$L = \mu_r \mu_0 n^2 \frac{A}{l} \Rightarrow \mu_r = \frac{Ll}{\mu_0 n^2 A}$$

Einsetzen der von (8) liefert:

$$\mu_r = \frac{\hat{u}}{\hat{i} \cdot \omega} \frac{l}{\mu_0 n^2 A}$$

Wir messen nun bei jeder Spannung den Strom und Impedanz der Spule. Des Weiteren tragen wir Z über I in einem Diagramm auf.

Wir messen nun  $\mu'_r$ , analog zu Aufgabe 1.2. Den Theoretischen Messwert können wir über:

$$\mu_{r,s} = \frac{\mu'_r}{(l - d) + d\mu'_r}$$

## 2.2 Aufgabe 2

### 2.2.1 B(I) / B(H) Kurven samt jungfräulicher Kurve

Mithilfe einer Hallsonde, die wir in den Luftspalt des Kerns einbringen, können wir die Hallspannung auslesen. Auf bewegte Ladung wirkt in einem Magnetfeld, senkrecht zur Bewegung und  $\vec{B}$ -Feld, eine Kraft. Diese Kraft wird Lorenz-Kraft genannt.

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

Dadurch wird in einem stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet, Ladung getrennt. Bei dieser Trennung entsteht ein  $\vec{E}$ -Feld, welches auf die Ladungen eine Kraft entgegen  $\vec{F}_L$  ausübt, die elektrische Kraft.  $\vec{F}_L = q \cdot \vec{E}$ . Sobald gilt:  $\vec{F}_L = -\vec{F}_E$  verschwindet die resultierende Kraft. Der nun vorhandene Potentialunterschied zwischen dem oberen und unteren Rand des Leiters kann man messen. Diese Potentialdifferenz nennt man "Hall-Spannung". Setzt man die oben erwähnten Kräfte gleich, so kommt man mit Hilfe der Stromdichte auf die Hall-Spannung:

$$U_H = -\frac{I_s}{n \cdot q} \cdot \frac{B}{d}$$

Bei der Hall-Sonde wird dieser Effekt ausgenutzt, um die Spannung zu messen. Anschließend kann man das  $\vec{B}$ -Feld berechnen. Die Hallkonstante

$$k_H = \frac{1}{qn}$$

muss hierbei noch bestimmt werden.

Wichtig dabei ist, die Hallsonde nicht allzulange in Betrieb zu lassen, um ein Überhitzen und somit ungenaue Messungen zu vermeiden.

Wir messen nun für den vorgegebenen Strombereich  $\pm 40mA$  einige Spannungen und somit auch Magnetische Flussdichten.

Anschließend tragen wir B über I auf.

Allerdings dürfen wir H nicht durch lineare Umskalierung berechnen, sondern müssen den Luftspalt berücksichtigen (I korrigieren). Somit bekommen wir für H:

$$H = \frac{n}{l} \cdot \left( I - \frac{l_s}{n\mu_0} B \right) = \frac{n}{l} I_{\text{korrr}}$$

Hierbei ist  $l_s$  die Länge des Luftspaltes,  $l$  die Länge des Eisenmagnets und  $n$  die Windungszahl der Spule. Anschließend können wir für jedes I den dazugehörigen H Wert berechnen und dann B über H auftragen, um die Hysteresisschleife zu bekommen.

Für die Permeabilitätszahl des Kerns kennen wir den linearen Zusammenhang:

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

somit kann  $\mu_r$  als Geradensteigung gesehen werden.

$$\mu_r = \frac{m}{\mu_0}$$

Diese soll sowohl für den korrigierten, als auch für den gemessenen I Wert bestimmt werden, um somit  $\mu_r$  und  $\mu_{r,s}$  zu berechnen und mit den in Aufgabe 1 berechneten Werten zu vergleichen. anschließend soll noch die Verlustleistung berechnet werden. Dabei gilt, dass die Fläche die Verlustleistung ist.

$$W = V_{\text{Kern}} A_{\text{Kurve}}$$

$$P = \frac{W}{T}$$

$$P = V_{\text{Kern}} A_{\text{Kurve}} f$$

### 2.2.2 Bis zu $\pm 1,2A$ messen

Hier messen und korrigieren wir die Werte analog wie oben beschrieben. Anschließend werden Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivkraft aus dem Schaubild abgelesen. Diese Punkte erhält man durch die Schnittpunkte mit den Achsen und Asymptote (Abb. 1).

## 2.3 Magnetische Feldstärke in zylindrischen Luftspulen

Hierbei soll gezeigt werden, dass reale Spulen oft eine große Abweichung von der Theorie haben. Zur Berechnung des Feldes kommt das Biot-Savartsche Gesetz zum Einsatz.

### 2.3.1 Eichen einer Longitudinalfeld-Hallsonde

Zum Eichen der Sonde steht eine Kalibrierspule zur Verfügung. Nachdem wir einen Steuerstrom von 125mA in der Sonde und 0,96A als Spulenstrom eingestellt haben, suchen wir das Minimum im Zentrum der Spule. An dieser Stelle soll das Feld 10mT betragen. Mithilfe der Magnetischen Flussdichte und  $U_H$  können wir anschließend die konstante  $k_H$  berechnen.

### 2.3.2 Magnetfeld entlang der Achse

Wir messen nun das B-Feld der zylindrischen Spule innerhalb und außerhalb der der symmetrischen Achse, welche durch den Mittelpunkt geht. Anschließend vergleichen wir sie mit den Theoretisch berechneten Werte von dem Biot-Savartschen-Gesetz:

$$B(x) = \frac{\mu_0 n I}{2l} \left( \frac{x + \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + (x + \frac{l}{2})^2}} - \frac{x - \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + (x - \frac{l}{2})^2}} \right)$$

hierbei ist R der Spulenradius, l die Länge der Spule und n die Windungszahl.

## 2.4 Demonstrationsversuch für dia-, para- und ferromagnetische Körper

Man kann Stoffe bezüglich ihrer magnetischen Eigenschaften unterteilen. Dabei werden die Atome als mag. Dipol angesehen, welche sich parallel zu einem äußeren Feld ausrichten. Es gibt drei verschiedene Verhalten von Materialien in B-Felder:

- diamagnetische:

Die Dipole werden induziert und sind entgegen dem äußeren Feld gerichtet. Dadurch erfolgt eine Abschwächung des äußeren Feldes. Dieser Effekt tritt bei allen Materien auf, wird aber häufig von para- oder ferromagnetischen Eigenschaften überdeckt!

⇒ das Plättchen dreht sich senkrecht zum Polschuh, entgegen dem Feld. Nach ausschalten des B-Feldes ist das Teilchen wieder entmagnetisiert.

- paramagnetisch:

Dipole haben eine nur Teilweise Ausrichtung und dadurch Verstärkung des B-Feldes. Bei Zimmertemperatur ist der Effekt kaum bemerkbar, da die thermischen Bewegungen den Effekt entgegenwirken.

⇒ Das Plättchen wird sich entlang des B-Feldes ausrichten und es verstärken. Nach abschalten wird es magnetisch neutral sein.

- ferromagnetisch:

Die Dipole haben eine starke Wechselwirkung untereinander, wodurch bei schwachem äußeren B-Feld schon sehr viele parallel ausgerichtete Dipole entstehen. Bei Dauerzustand spricht man von einem Permanentmagnet.

⇒ Das Plättchen wird sich entlang des B-Feldes ausrichten und es verstärken. Nach abschalten wird es nicht mehr magnetisch neutral sein.

## Teil II

# Quellenverzeichnis

- Lernblätter zur Experimentalphysik II
- Hans J. Paus: Physik in Experimenten und Beispielen (3. Auflage)
- Literaturliste

# Messprotokoll

Datum: 30.11.09

Ort: KIT, Karlsruhe

Daniel Wolf, Paul Schnäbele

## Aufgabe 1

1.1 Entmagnetisierung durchgeführt  
↳ leider keine Mgl. zur Prüfung

1.2

$$Z = \frac{U}{I}$$

(OHNE LUFTSPALT)

①

$\frac{U}{V}$	5	10	15	20	25
$\frac{I}{A}$	0,24	0,48	0,75	1,05	1,35

Messung bei Gleichspannung zur Bestimmung von  $R_L$ .

② Messung bei Wechselspannung zur Bestimmung von  $Z_{ges}$ .

$\frac{U}{V}$	5	10	15	20	25	30
$\frac{I}{mA}$	1,7	2,8	3,5	4,4	5,1	5,7

Anmerkung: Es war gefordert auch für  $U=30V$  zu messen. Dies war allerdings nicht mgl., da die Spannungsquelle keine 30V-Spannung liefert (→ bei Gleichspannung).

jetzt mit Luftspalt:

$\frac{U}{V}$	5	10	15	20	25	30
$\frac{I}{mA}$	4,7	8,5	12,5	16,0	19,5	23,0

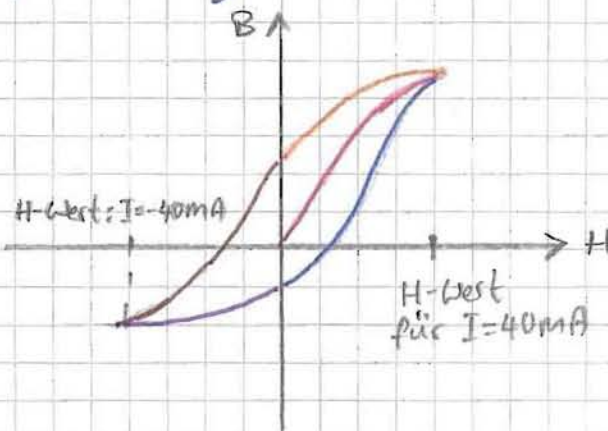
↳ Messung bei Gleichspannung, um Ohmschen Widerstand der Spule zu bestimmen.

$R$



## Aufg. 2

Die verwendete Hall-Sonde gibt sofort (ohne Eichung) Werte für die magnet. Flussdichte aus.



### 1. Messung:

$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{B}{\text{mT}}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{B}{\text{mT}}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{B}{\text{mT}}$
0	8,2	5	15,1	-10	-1,6
5	12,5	0	11,7	-5	2,2
10	16,0	-5	7,6	0	5,3
15	20,3	-10	3,8	5	9,8
20	24,3	-15	-0,9	10	13,8
25	28,6	-20	-5,5	15	18,3
30	32,8	-25	-9,6	20	23,3
35	37,5	-30	-14,2	25	27,2
40	42,2	-35	-19,0	30	31,7
35	38,8	-40	-25,4	35	35,6
30	34,5	-35	-21,2	40	41,7
25	30,9	-30	-17,0		
20	27,2	-25	-13,4		
15	22,8	-20	-10,0		
10	18,9	-15	-5,6		

## 2. Messung:

$\frac{I}{A}$	$\frac{B}{mT}$	$\frac{I}{A}$	$\frac{B}{mT}$	$\frac{I}{A}$	$\frac{B}{mT}$
0	8	0	16,6	0	-19,1
0,1	104,4	-0,1	-71,4	0,1	76,0
0,2	189,5	-0,2	-134	0,2	179
0,3	253	-0,3	-289	0,3	284
0,4	363	-0,4	-381	0,4	381
0,5	462	-0,5	-480	0,5	474
0,6	544	-0,6	-567	0,6	555
0,7	614	-0,7	-631	0,7	629
0,8	688	-0,8	-697	0,8	699
0,9	746	-0,9	-760	0,9	757
1,0	790	-1,0	-800	1,0	808
1,1	822	-1,1	-833	1,1	837
1,2	847	-1,2	-857	1,2	861
1,1	826	-1,1	-837		
1,0	801	-1,0	-811		
0,9	762	-0,9	-771		
0,8	703	-0,8	-715		
0,7	638	-0,7	-653		
0,6	556	-0,6	-581		
0,5	480	-0,5	-507		
0,4	390	-0,4	-403		
0,3	293	-0,3	-302		
0,2	190	-0,2	-211		
0,1	106,4	-0,1	-105		

### Aufgabe 3

Minimum:  $U_H = 0,62 \text{ mV}$  bei  $I = 0,96 \text{ A}$

(zur Eichung)

Ort in cm	$\frac{U_H}{\text{mV}}$	Ort in cm	$\frac{U_H}{\text{mV}}$
87	0,020	68	0,570
86	0,025	67	0,570
85	0,030	66	0,570
84	0,030	65	0,570
83	0,035	64	0,570
82	0,040	63	0,565
81	0,055	62	0,560
80	0,075	61	0,550
79	0,100	60	0,540
78	0,135	59	0,520
77	0,190	58	0,490
76	0,260	57	0,450
75	0,340	56	0,390
74	0,410	55	0,320
73	0,470	54	0,240
72	0,510	53	0,170
71	0,535	52	0,120
70	0,550	51	0,090
69	0,560	50	0,070

Ort in cm	$\frac{B}{mT}$
49	0,050
48	0,040
47	0,030
46	0,030
45	0,025
44	0,020
43	0,020
42	0,020

a) linkes Ende der Spule bei  $x=9\text{cm}$

a) rechtes Ende der Spule bei  $x=29\text{cm}$

### Demonstrationsversuch:

↳ Diamagnet. Effekt gut beobachtbar! → Foto

2

# Magnetfeldmessungen (P1-80) - Auswertung

Daniel Wolf, Paul Schnäbele (Mo-30)

1.12.09

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabe 1</b>	<b>2</b>
1.1 Entmagnetisierung . . . . .	2
1.2 Bestimmung des induktiven Widerstandes . . . . .	2
1.3 Bestimmung der Induktivitäten . . . . .	5
1.4 Bestimmung der Permeabilitäten . . . . .	5
<b>2 B(H)-Kurven</b>	<b>5</b>
2.1 Erste B(H)-Kurve . . . . .	6
2.1.1 Permeabilität . . . . .	7
2.1.2 Verlustleistung . . . . .	8
2.2 Zweite B(H)-Kurve . . . . .	8
2.2.1 Remanenz . . . . .	9
2.2.2 Koerzitivfeldstärke . . . . .	10
2.2.3 Sättigungsmagnetisierung . . . . .	10
<b>3 Magnetfeld einer Zylinderspule (Solenoid)</b>	<b>10</b>
<b>4 Demonstrationsversuch</b>	<b>11</b>
<b>5 Hilfsmittel</b>	<b>12</b>

# 1 Aufgabe 1

## 1.1 Entmagnetisierung

Zunächst sollte es darum gehen, den Eisenkern zu entmagnetisieren. Dazu wurde die dafür vorgesehene Spule (125+125 Windungen) verwendet. Wir drehten den Wechselstrom zunächst maximal auf und fuhren dann langsam zurück. Der Vorgang dauerte bis zu drei Minuten. Dieses Verfahren zur Entmagnetisierung verwendeten wir noch einige Male im Laufe des Versuchs; insbesondere bei der Bestimmung der B(H)-Kurven war ein (nahezu) nicht magnetischer Ausgangszustand nötig.

## 1.2 Bestimmung des induktiven Widerstandes

Nun steckten wir zwei gleiche Spulen auf die Seiten des Eisen-U-Kerns und schlossen die Anordnung mit dem Eisenjoch. Wir verschalteten die Spulen gemäß Abb. 4 der Vorbereitung. Dabei wurde mit einem digitalen Gerät spannungsrichtig gemessen. Den Strom bestimmten wir mit einem analogen Messgeräte, wobei darauf zu achten war, dass stets im oberen Bereich der Skala gemessen werden sollte<sup>1</sup>.

Für den induktiven Widerstand  $X_L$  leiteten wir in der Vorbereitung die Beziehung  $X_L = \sqrt{Z_{ges}^2 - R_L^2}$  her. Demnach ist der Ohmsche Widerstand  $R_L$  der Spulen und der Gesamtwiderstand  $Z_{ges}$  zu bestimmen. Beide Werte erhält man durch Messung von Strom und Spannung. Über  $Z = \frac{U}{I}$  können wir dann beide Werte aus den experimentelle Ergebnissen berechnen. Dazu sei angemerkt, dass wir aufgrund der spannungsrichtigen Schaltung zwar "korrekte" Spannungswerte ermittelten, die Ströme allerdings verfälscht wurden. Diese systematische Messabweichung sollte aber gering ausfallen, zumal der Ohmsche Widerstand von Spulen recht klein ist und somit nur sehr wenig Strom durch das Voltmeter fließt.

Wir führten also eine Messung bei Gleichstrom und eine bei Wechselstrom durch. Liegt nämlich eine Gleichspannung an den Spulen an, so lässt sich der Ohmsche Widerstand durch Messen von Strom und Spannung bestimmen. Abb. 1 zeigt die Ausgleichsgerade für den den Ohmschen Widerstand. Origin Labs gibt uns unseren Messwert (Steigung der Ausgleichsgeraden) an. Wir erhalten  $R_L = (17,88 \pm 0,48)\Omega$ . Dies stimmt einigermaßen mit den Angaben auf den Spulen überein .

Die Ergebnisse unserer Messreihe zur Bestimmung der Gesamtimpedanz  $Z_{ges}$  zeigt die folgende Tabelle und Abb. 2.

$\frac{U}{V}$	5	10	15	20	25
$\frac{I}{A}$	$4,70 \cdot 10^{-3}$	$8,50 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$1,60 \cdot 10^{-2}$	$1,95 \cdot 10^{-2}$
$\frac{R_L}{\Omega}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$

<sup>1</sup>Das hängt damit zusammen, dass bei Messbereichen für kleine Ströme der parallelgeschaltete Nebenwiderstand größer werden muss. Dies erhöht auch die Messfehler. Deswegen ist es am geschicktesten, den Messbereich so zu wählen, dass der Wert im oberen Drittel der Skala angezeigt wird.

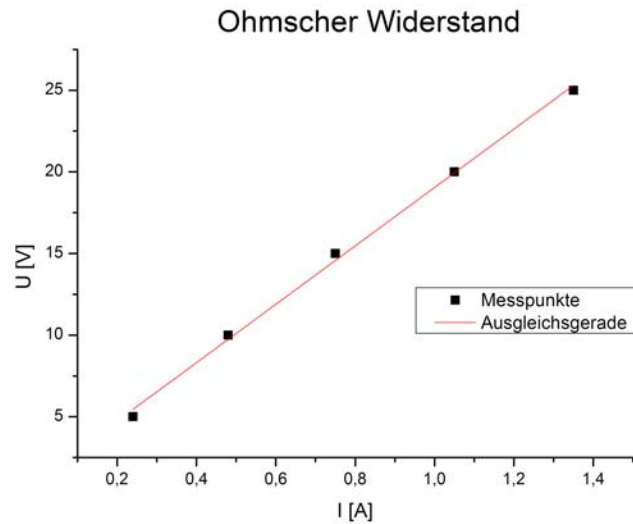


Abbildung 1: Messreihe zur Bestimmung des Ohmschen Widerstandes  $R_L$

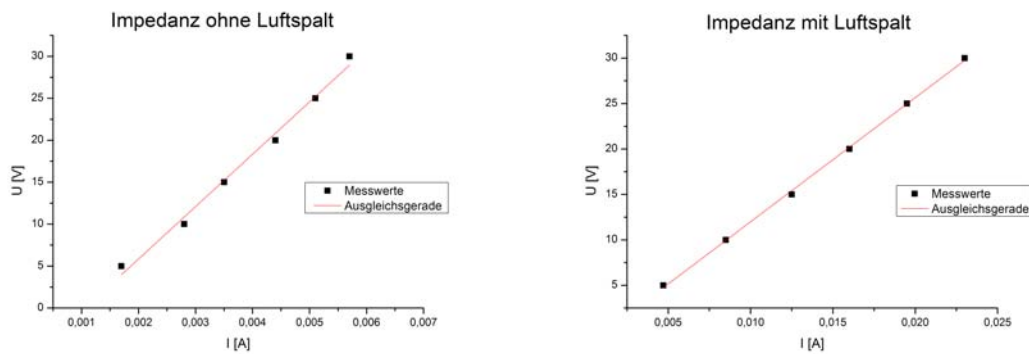


Abbildung 2:  $Z_{ges}$  in Abhängigkeit vom Strom I

Hieraus erhalten wir (ebenfalls durch Lineare Regression)  $Z_{ges} = (6242, 51 \pm 286, 10)\Omega$ . Allerdings wird dieser Wert zur Erstellung des gefragten Diagramms (Abb. 3) nicht benötigt. Hier werden die für jede Einzelmessung berechneten induktiven Widerstände über dem Strom aufgetragen.

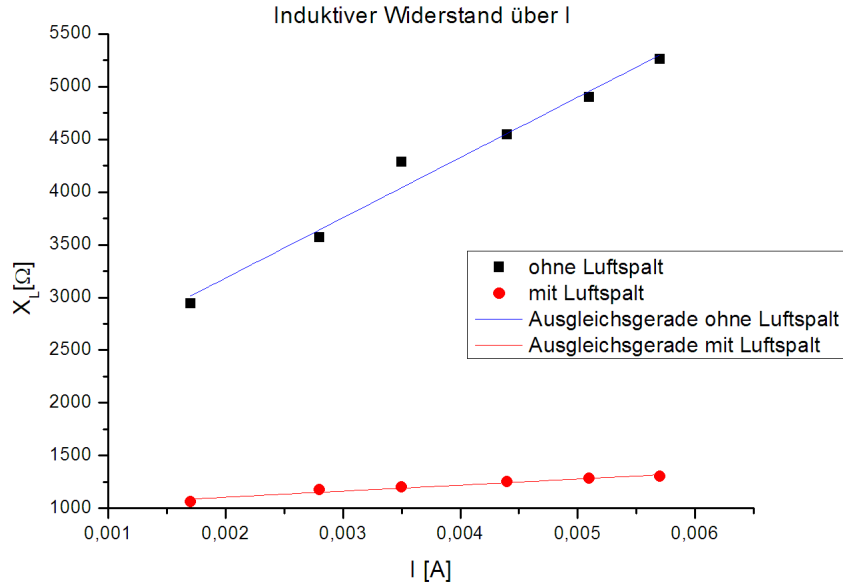


Abbildung 3: Induktiver Widerstand  $X_L$

Im Mittel erhalten wir für die induktiven Widerstände:

- mit Spalt:  $X_L = 1212,62\Omega$
- ohne Spalt:  $X_L = 4251,43\Omega$

Besonders die Ergebnisse der Messung ohne Luftspalt entsprechen keinesfalls den Erwartungen. Die Werte für die induktiven Widerstände steigen mit größer werdendem Strom an. Wir hatten eine Parallele zur x-Achse erwartet, zumal  $X_L = \omega L$  von der Frequenz abhängt, die wir hier nicht veränderten. Eine Abhängigkeit von  $X_L$  von der Stromstärke  $I$  entspricht nicht der physikalischen Theorie. Die Messpunkte für den Versuch mit Spalt (rot) könnte man durch Messungenauigkeiten zu erklären versuchen. Allerdings ist auch hier die Tendenz größer werdender induktiver Widerstände deutlich.

Wir gehen davon aus, dass die Abweichung von der Theorie mit der Magnetisierung des Eisenkerns zusammenhängt. Die Induktivität der gesamten Anordnung ändert sich wohl bei steigendem Strom. So könnte man sich vorstellen, dass das Material des Kerns zu träge bzw. die Frequenz zu hoch ist, um sich (vollständig) zu magnetisieren, bevor die Spannung und damit das Magnetfeld die Richtung ändert. Fließt nun ein höherer Strom, so geht der Vorgang der Magnetisierung schneller von Statten, sodass die Magnetfeldänderung und damit die induzierte Spannung größer ausfallen. Dies würde einen höheren induktiven Widerstand erklären. Es ist gut möglich, dass noch weitere Gründe für die auftretende Diskrepanz zwischen Theorie und Praxis eine Rolle spielen.



### 1.3 Bestimmung der Induktivitäten

Für die Induktivitäten erhalten wir durch Umstellen von  $X_L = \omega L$  und durch Einsetzen der Netzfrequenz von  $f=50\text{Hz}$ :

- ohne Spalt:  $L = 16,75H$
- mit Spalt:  $L = 4,15H$

### 1.4 Bestimmung der Permeabilitäten

Über die in der Vorbereitung aufgeführten Formeln berechnen wir die folgenden Permeabilitäten:

- ohne Spalt:  $\mu = 1025,51$
- mit Spalt:  $\mu' = 257,67$

Dazu ist zu sagen, dass die angegebene Permeabilität für den Versuch mit Spalt einen „scheinbaren Wert“ darstellt. Schließlich verändert der luftgefüllte Spalt, welchen wir mit einer zu einer Seite hin offenen Unterlegscheibe realisierten<sup>2</sup>, das Messergebnis enorm, da auf diesem kleinen Volumen die Permeabilität auf 1 abfällt. Dadurch erhalten wir eine wirksame Permeabilität, welche allerdings nicht mehr zur Charakterisierung des Materials des U-Kernes dienen kann. Insofern war es zu erwarten, dass dieses  $\mu'$  kleiner ausfallen würde als die Permeabilität des Kerns.

Das Ergebniss für den Versuch ohne Spalt trifft auch die Erwartungen, zumal ein ferromagnetisches Material sehr hohe Permeabilitäten aufweist. An dieser Stelle ist allerdings kein Vergleich mit einer Angabe des Herstellers möglich, da diese nicht vorliegt.

## 2 B(H)-Kurven

Wir bereiteten den Versuch gemäß Anleitung auf dem Aufgabenblatt vor. Die Hallsonde konnten wir in den Spalt einführen, um das Magnetfeld zu messen. Sie zeigte uns sofort Werte für die magnetische Flussdichte an, ohne dass wir vorher eine Eichung durchführen mussten. Nun führten wir zwei Messreihen durch und hielten die Messpunkte im Protokoll tabellarisch fest. Dabei notierten wir jeweils die magnetische Flussdichte in Abhängigkeit des Spulenstroms. Die Umrechnung auf eine Abhängigkeit von H erfolgte durch die auf dem Aufgabenblatt angegebene Formel. Dies ermöglichte uns letztlich die Darstellung unserer experimentellen Ergebnisse in Form der Hystereseschleifen. Allerdings führten wir hier eine Korrektur der B-Werte durch, um das Erstellen des Diagramms sinnvoll zu ermöglichen. Bei beiden Messreihen gelang es -

---

<sup>2</sup>Auf der anderen Seite des Jochs sorgte eine normale Unterlegscheibe dafür, dass sich kein Höhenunterschied einstellte.

trotz Geduld beim Entmagnetisieren (s. Aufg. 1.1) - nicht den Eisen-U-Kern samt Joch völlig von seinen Permanentmagneteigenschaften zu befreien. Wir stellten mit der Hallsonde jeweils ein verbleibendes  $\vec{B}$ -Feld von etwa 8mT fest. Diese remanente Flussdichte zogen wir bei jedem gemessenen Wert für B ab<sup>3</sup>. Dadurch verschoben wir sozusagen das Nullniveau der y-Achse. Durch dieses Vorgehen werden die Messwerte also nicht verfälscht.

## 2.1 Erste B(H)-Kurve

In der ersten Messreihe führen wir den Strom hoch bis auf +40mA, reduzierten ihn wieder auf 0, um dann die Stromrichtung umzukehren (Umpolung an Spannungsquelle) und bis -40mA zu messen. Anschließend erhöhten wir wieder schrittweise bis auf 40mA. Dabei war darauf zu achten, dass die Messung kontinuierlich von Statten ging. Es durften also keine Messwerte vergessen werden, da ein „Zurückgehen“ auf einen vorangehenden Stromwert den Rest der Messung zu Nichte machen könnte.

Zunächst die B(I)-Kurve:

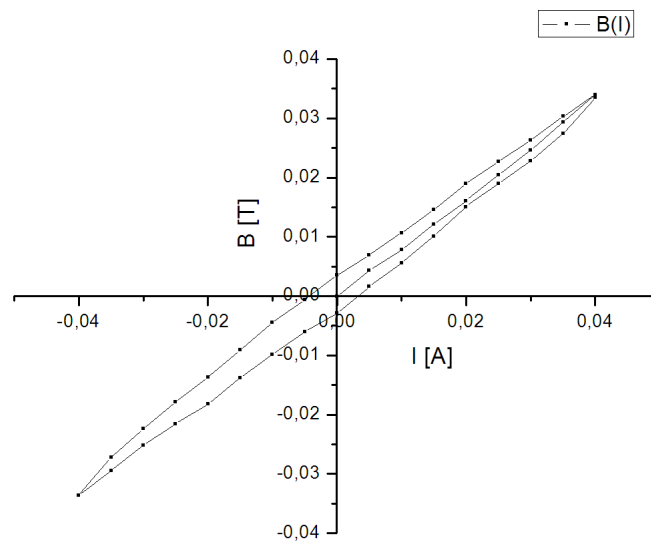


Abbildung 4: B(I)-Kurve, 1. Hystereseschleife

Und nach Umrechnung die eigentliche Hystereseschleife:

<sup>3</sup>Im Messprotokoll sind die ursprünglichen Messwerte festgehalten. Die korrigierten Werte sind in unseren Excel- und Origin- Tabellen zu finden.

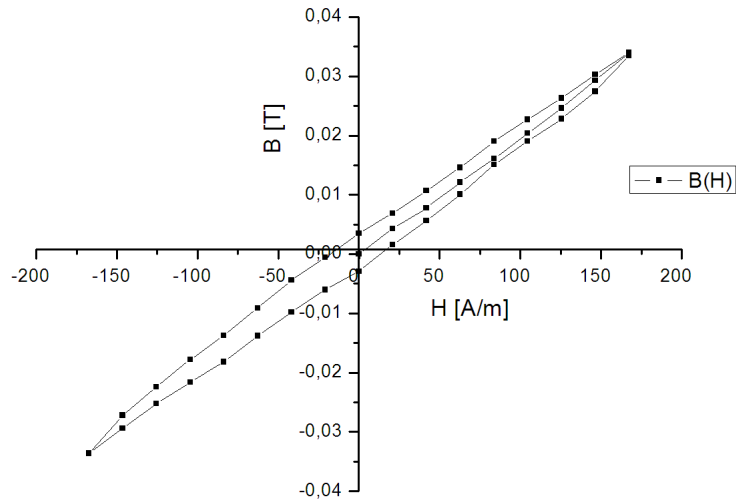


Abbildung 5: Hystereseschleife, Strom bis 40mA

### 2.1.1 Permeabilität

Die Werte für die Permeabilität ergeben sich aus der Steigung der Ausgleichsgerade - also als Konstante  $\frac{B}{H}$ . Es muss dann noch durch  $\mu_0$  geteilt werden. Mit Ausgleichsgerade ist hier eine durch lineare Regression bestimmte Gerade gemeint, die für die ersten Wertepaare der Neukurve bestimmt wird.

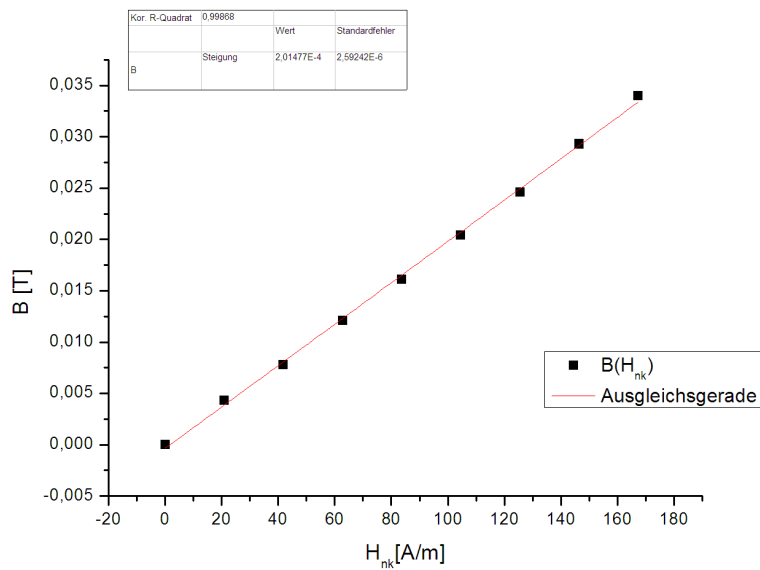


Abbildung 6: Ausgleichsgerade (nicht korrigierte Werte)

Wir erhalten für die Permeabilität (nicht korrigierte Werte):  $\mu = 511,02$ . Ein Vergleich mit dem in 1.4 gefundenen Wert für  $\mu$  ergibt eine Veränderung um etwa den Faktor 0,5. Es gibt also deutliche Diskrepanzen!

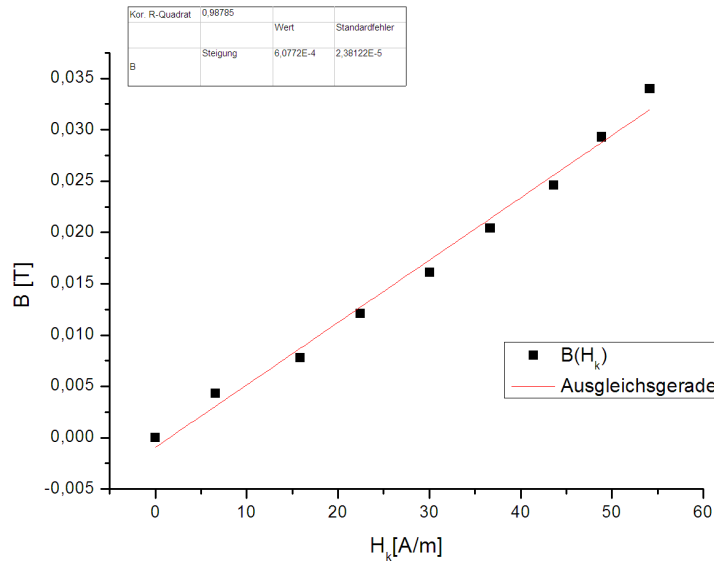


Abbildung 7: Ausgleichsgerade (korrigierte Werte)

Wir erhalten  $\mu' = 162,06$  als scheinbare Permeabilität und vergleichen mit  $\mu'$  aus 1.4. Auch hier ist der nun ermittelte Wert deutlich kleiner.

### 2.1.2 Verlustleistung

Hierfür muss die Fläche unter der Hysteresekurve bekannt sein. Wir bestimmten sie mit Hilfe des PCs zu  $A=1,314$  und geben ihr sinnvollerweise die Dimension  $\frac{TA}{m}$ . Die Frequenz und das Volumen des Kerns sind angegeben. Mit  $P = V \cdot A \cdot f$  erhalten wir für die Verlustleistung:  $P = 49,2mW$ .

## 2.2 Zweite B(H)-Kurve

Hier führen wir analog zu 2.1 vor. Allerdings wurde der Strom hier im Bereich von  $\pm 1,2A$  variiert.

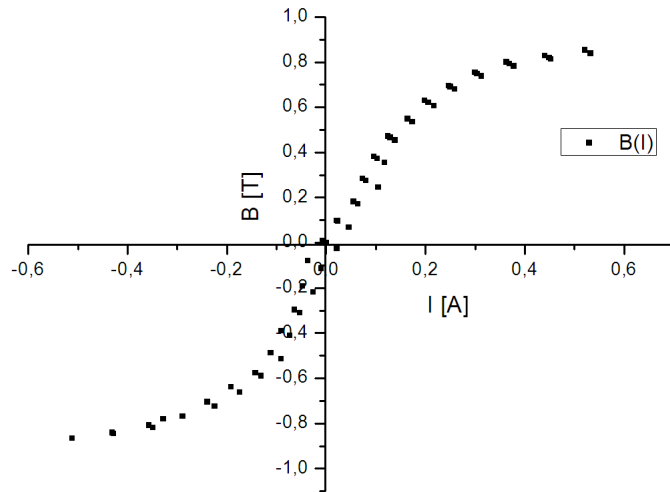


Abbildung 8:  $B(I)$ -Kurve, 2. Hystereseschleife

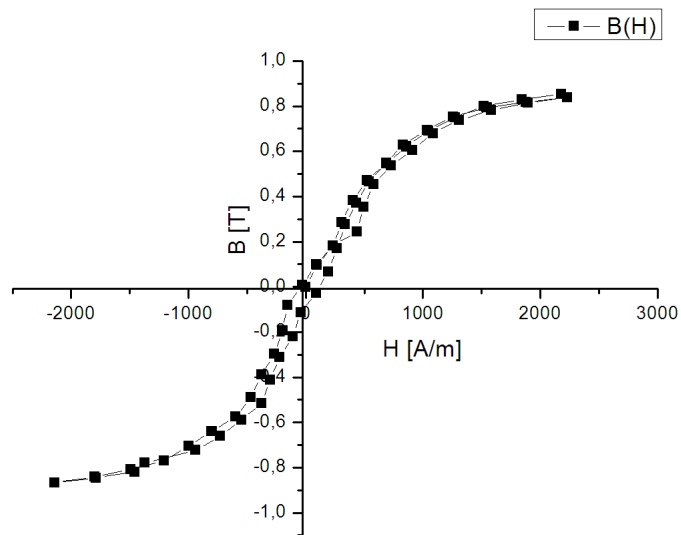


Abbildung 9: Hystereseschleife, Strom bis 1,2A

### 2.2.1 Remanenz

Wir erhalten durch Ablesen aus dem  $B(H)$ -Diagramm:  $B_{rem} = 28,69mT$   
 Dabei legen wir lokal eine Ausgleichkurve durch die Messpunkte.

### 2.2.2 Koerzitivfeldstärke

analog zu 2.2.1,

Wir erhalten:  $H_{koerz} = -40,88 \frac{A}{m}$

### 2.2.3 Sättigungsmagnetisierung

- Sättigungs-Flussdichte:  $B_{Sättigung} \approx 860mT$
- Sättigungs-Magnetisierung:  $M_{Sättigung} = 402.650 \frac{A}{m}$

## 3 Magnetfeld einer Zylinderspule (Solenoid)

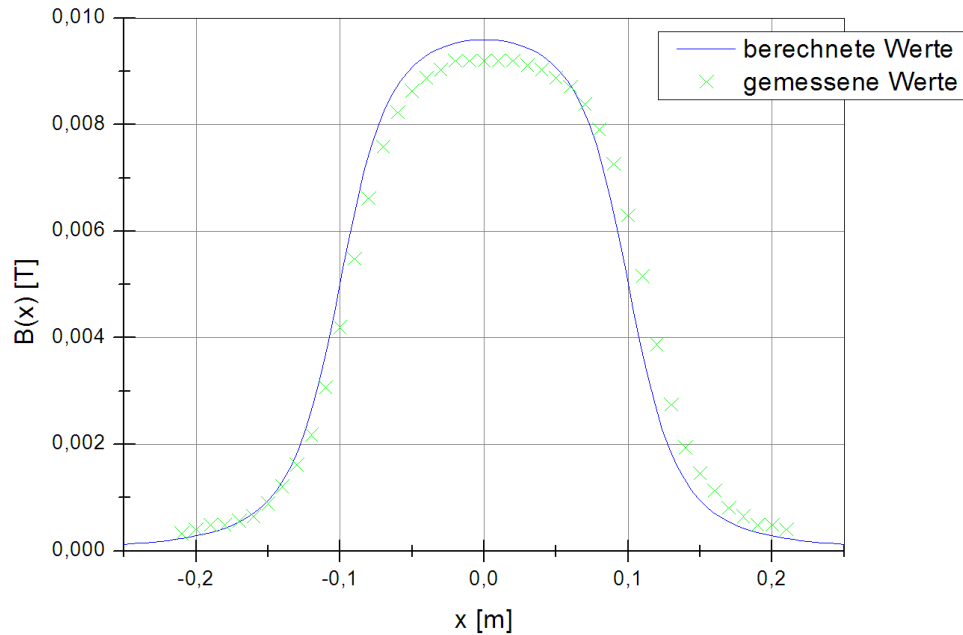


Abbildung 10: Magnetfeldmessung am Solenoid

In diesem Versuch sollte das Magnetfeld eines Solenoids auf der Spulenachse experimentell bestimmt werden. Dazu nutzten wir eine andere Hall-Sonde, welche zunächst geeicht werden musste. Dies erfolgte mit Hilfe einer kleinen Kalibrierspule. Wie in der Vorbereitung bereits erläutert, musste hier der Punkt, an dem das Magnetfeld (10mT) bekannt ist, lokalisiert werden. Auf diese Weise bestimmten wir die Eichkonstante. Wir erhielten:

$$B = const. \cdot U_H \iff const. = \frac{B}{U_H} = 16,13 \frac{T}{V}$$

Dies ermöglicht uns die Umrechnung der experimentell festgehaltenen Messwerte für die Hallspannungen in magnetische Flussdichten.

Wir begannen die Messungen 10cm vor der Spule und gingen in 1cm-Schritten vor, bis die Hallsonde 10cm aus der Spule herausschaute. Dabei hielten wir für jeden Messwert den aktuellen Ort fest.

Mit Abb. 10 kann man den direkten Vergleich zwischen unseren Messergebnissen und der berechneten Kurve<sup>4</sup> anstellen. Der Versuch ergab in diesem Fall also eine gute Übereinstimmung mit der Theorie.

## 4 Demonstrationsversuch

In einem Demonstrationsversuch sollten abschließend rein qualitativ, Beobachtungen zu magnetischen Eigenschaften von Para-, Dia- und Ferromagneten gemacht werden. Aus der Vorbereitung gehen unsere Erwartungen bezüglich des Verhaltens dieser drei Stofftypen hervor. Der Versuch mit dem Paramagneten wurde nicht durchgeführt.

Um Untersuchungen anstellen zu können, brachten wir die dia-, para- bzw. ferromagnetischen Probestäbchen zwischen zwei Polschuhe, welche das Eisenjoch aus den vorangehenden Versuchen ersetzten. Die beiden Spulen auf dem Eisen-U-Kern waren weiterhin installiert und stromdurchflossen, sodass ein inhomogenes Magnetfeld vorlag (s. Foto; Abb. 11). Deutlich zu erkennen war, dass der diamagnetische Stoffe, dem „Magnetfeld entweichen wollte“. Er pendelte zügig zwischen den Spitzen der beiden Polschuhe hin- und her, ohne einer der beiden sehr Nahe zu kommen bzw. sie zu berühren. Eine solche Beobachtung ist in Übereinstimmung mit dem, was wir qualitativ bei diamagnetischen Stoffen erwarten.

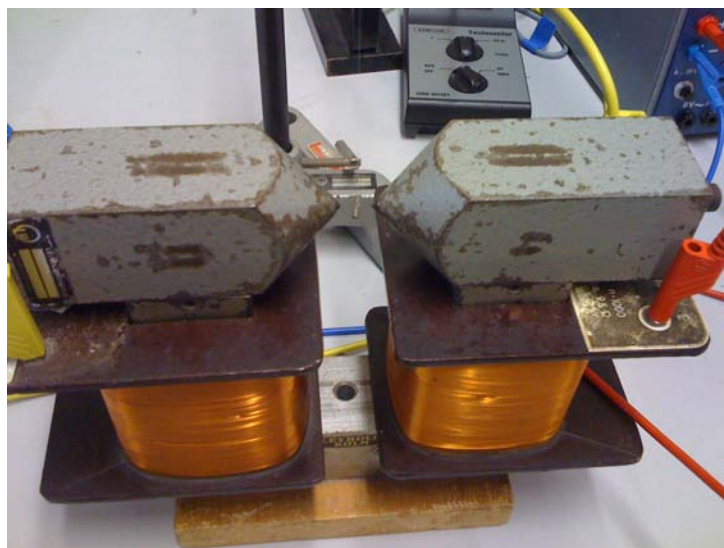


Abbildung 11: Diamagnet im inhomogenen Magnetfeld

---

<sup>4</sup>Plot der Formel aus der Vorbereitung

Beim ferromagnetischen Probestäbchen ließ sich lediglich beobachten, dass es bereits vor Einschalten des Stroms einen der beiden Polschuhe berührte, da diese - trotz versuchter Entmagnetisierung - noch zu starke Permanentmagneten darstellten. Die Beobachtung der Eigenschaften von Ferromagneten war allerdings bereits im ersten Versuchsteil möglich. So war z. B. das Eisenjoch fest mit dem U-Kern verbunden, nachdem Gleichstrom durch die beiden Spulen geflossen war. Schließlich wurde der Ferromagnet (Eisen-U-Kern + Joch) magnetisiert! Die Eigenschaften von ferromagnetischen Stoffen sehen wir also - qualitativ - als experimentell bestätigt an.

## 5 Hilfsmittel

- Origin Lab Pro
- Excel