

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P1**

**Magnetfeldmessungen**  
**P1-80**

Protokoll von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: Do-28

Versuchsdatum: 10. November 2011



**Aufgaben:**

1.) Die folgenden Messungen zeigen, daß die Induktivität einer Eisenkernspule von der Erregung abhängig ist und daß ein Luftspalt im Eisenkern diese Abhängigkeit mindert.

**1.1 Entmagnetisieren Sie den Kern.** Verwenden Sie dazu die Spule mit 125+125 Windungen, lassen Sie durch 125 Windungen zunächst den bei geschlossenem Kern maximal möglichen Wechselstrom (ca.0,75A) fließen und regeln Sie dann den Strom langsam auf Null zurück. Überlegen Sie sich Methoden zur Prüfung des Erfolges der Entmagnetisierung. Gute Entmagnetisierung ist wichtig für 2.1!

**1.2 Messen Sie den induktiven Widerstand zweier sinnvoll in Serie geschalteter Spulen mit je 1000 Windungen bei geschlossenem gemeinsamen Eisenkern in Abhängigkeit vom Spulenstrom.** In einer spannungsrichtigen Schaltung wird der Wechselstrom mit dem Instrument 'Metravo 2', die Wechselspannung (5V bis 30V in 5V-Schritten) mit dem Instrument 'Voltcraft' gemessen.

**1.3 Führen Sie die 1.2 entsprechende Messung nach Einfügen eines Luftspaltes ( $\ell_S = 2\text{mm}$ ) durch.** Zwischen U-Kern und Joch wird auf einer Seite eine 2mm-Eisenplatte, auf der anderen Seite ein 2mm-Abstandsstück aus nicht ferromagnetischem Material eingelegt. Tragen Sie in einem Diagramm beide  $R_L(I)$ -Kurven auf, und begründen Sie die Ergebnisse qualitativ (evtl. nach Erledigung der nächsten Aufgabe). Berechnen Sie jeweils beim größten Meßstrom die Induktivität und daraus sowie aus der Kerngeometrie jeweils die wirksame relative Permeabilität des Kernes. Bei Vorhandensein eines Spaltes ergibt sich allerdings nur ein 'scheinbarer' Wert der Permeabilität. Bei allen Rechnungen dürfen vernachlässigbare Verlustwiderstände und ein vernachlässigbarer Streufluß außerhalb des Kernes angenommen werden.

2.) Die bisher gefundenen Effekte werden durch Messen von Hysteresisschleifen  $B(H)$  näher untersucht.

**2.1 Messen Sie mit dem Ziel einer  $B(H)$ -Kurve für das verwendete Eisen mit Hilfe einer Hallsonde im Luftspalt des Kerns zunächst eine  $B(I)$ -Kurve samt Neukurve.** Schalten Sie außer dem Strommeßgerät noch einen  $600\Omega$ -Widerstand in Serie zu den Spulen, um am Netzgerät den Spulengleichstrom  $I$  besser einstellbar zu machen. Beginnen Sie mit dem Strom Null und steigern Sie ihn zunächst (ohne zwischenzeitliche Überhöhungen) schrittweise bis  $+40\text{mA}$ , dann zurück bis Null, weiter bis  $-40\text{mA}$ , wieder bis Null und schließlich wieder bis  $+40\text{mA}$ .

Die gewonnene  $B(I)$ -Kurve wird nicht einfach durch lineare Umskalierung zu einer Hysteresisschleife des verwendeten Eisens! Es gilt **nicht**  $H = n/\ell \cdot I$  ! Der Luftspalt ist zu berücksichtigen:  $H_S \cdot \ell_S + H \cdot \ell = n \cdot I$ .

( $H_S = B/\mu_0 = H$ -Wert im Spalt;  $\ell_S =$  Feldlinienlänge im Spalt;  $H = H$ -Wert im Eisen;  $\ell =$  Feldlinienlänge im Eisen;  $B = B$ -Wert im Eisen und im Spalt [Stetigkeit!]) Es folgt:

$$H = n/\ell \cdot \{ I - (\ell_S / n\mu_0) \cdot B \} = n/\ell \cdot I_{\text{korr}}$$

Von jedem  $I$ -Wert eines Wertepaares ( $I, B$ ) muß ein  $B$ -proportionaler Anteil subtrahiert werden, um den Einfluß des Spaltes auf die Form der Meßkurve zu eliminieren. Eine solche Abbildung heißt 'Scherung'. Führen Sie die Scherung aus, und versehen Sie anschließend die Achsen mit zusätzlichen Skalen für  $H$  und  $B$ . Berechnen Sie aus der mittleren Steigung der nicht korrigierten Schleife die 'scheinbare' relative Permeabilität und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem von Aufgabe 1.3. Entnehmen Sie der korrigierten Schleife wiederum die relative Permeabilität und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem von Aufgabe 1.2. Berechnen Sie aus der Schleifenfläche die Verlustleistung im Kern bei Annahmevern 50Hz-Betrieb.

**2.2 Wiederholen Sie die Messung von Aufgabe 2.1, jedoch bis zu  $I \cong \pm 1,2A$**  (ohne  $600\Omega$ -Widerstand!). Wieder ist die Scherung der gemessenen Schleife auszuführen und das Ergebnis mit dem von Aufgabe 2.1 zu vergleichen. Nötigenfalls sollte jetzt die Diskussion der Ergebnisse von Aufgabe 1 fortgesetzt werden. **Bestimmen Sie außerdem Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivkraft.** Beim Messen auf konstanten Steuerstrom durch die Hallsonde (temperaturabhängiger Widerstand) achten!

3.) Bei der folgenden Aufgabe geht es um die magnetische Feldstärke in stromdurchflossenen zylindrischen Luftspulen, also um eine Anwendung des Biot-Savartschen Gesetzes. Es zeigt sich, daß bei realen Spulen meist mit beträchtlichen Abweichungen von der nach der Formel für lange Spulen berechneten Feldstärke gerechnet werden muß.

**3.1 Eichen Sie eine Longitudinalfeld-Hallsonde.** Dazu steht eine Kalibrierspule zur Verfügung, deren Feld im Zentrum aufgrund eines Windungsspalt es ein Minimum aufweist, das mit der Sonde gut zu lokalisieren ist. Stellen Sie einen Steuerstrom von  $120mA$  für die Sonde und einen Spulenstrom von  $0,96A$  ein, bei dem die Feldstärke  $B$  im genannten Minimum  $10mT$  beträgt. Nullabgleiche nicht vergessen!

**3.2 Messen Sie das Magnetfeld einer Zylinderspule längs der Achse innerhalb und außerhalb mit Hilfe der Hallsonde aus.** Tragen Sie die Meßwerte zusammen mit den aus der Spulengeometrie und elektrischen Daten berechneten Werten in ein Diagramm ein. (Spulenstrom  $I = 2A$ ).

**4.) Diese letzte Aufgabe ist ein reiner Demonstrationsversuch, der die unterschiedliche Wirkung eines inhomogenen Magnetfeldes auf dia-, para- und ferromagnetische Körper zeigt.** Bringen Sie in das stark inhomogene Feld zwischen den auf den U-Kern montierten spitzen Polschuhen (ca.  $10mm$  Abstand) nacheinander die an einem sehr dünnen Perlonfaden (Vorsicht!) leicht drehbar hängenden Probestäbchen aus Fe, Al und Bi. Stellen Sie sie ohne Feld auf etwa  $45^\circ$  gegen die Verbindungslinie zwischen den Polspitzen gedreht ein. Beobachten und erklären Sie die Effekte beim Einschalten des Feldes ( $2 \times 1000$  Windungen, maximal möglicher Gleichstrom). Das diamagnetische Probestäbchen muß extrem sauber sein. Kleinste Verunreinigungen überdecken den diamagnetischen Effekt. Nötigenfalls mit Alkohol reinigen und nur mit der Plastikpinzette anfassen. Vor dem Versuch mit dem ferromagnetischem Material muß der Magnetkern möglichst gut entmagnetisiert werden. Anschließend den Magnetstrom nur sehr vorsichtig von Null her steigern.

#### **Zubehör:**

Netzgerät (regelbar bis ca.  $25V=$ ,  $30V\sim$ )

lamellierter Eisen-U-Kern mit Joch (Querschnitt  $3,9cm \times 4,0cm$ , mittlere Feldlinienlänge im Fe  $48cm$ )

Distanzstücke ( $4cm \times 4cm$  Fe sowie  $4cm \times 4cm$ -U-Form aus Messing, je  $2mm$  dick)

Aufsteckspulen ( $125+125$  Wdg.,  $500+500$  Wdg.,  $500+500$  Wdg.)

2 spitze, kegelförmige Polschuhe mit Halteklammern

Hallsonde, passend zum Distanzstück für den Magnetpalt mit digitaler Anzeige

Zylinderspule (Länge  $20,8cm$ ; Radius  $3,7cm$ ;  $814$  Wdg.)

Hallsonde für Longitudinalfeldmessungen in der Spule; Kalibrierspule zur Hallsonde ( $10mT$  bei  $0,96A$ )

Hallsonden-Anschlußgerät (mit Versorgungsspannung; Steuerstromregelung; Steuerstrommeßgerät;

$U_H$ -Nullabgleich; Hallspannungsmeßgerät  $100mV$ ; Anschlußbuchsen für externes Hallspannungs-Meßgerät)

Millivoltmeter mit Transistorverstärker (Bauart 'Knick', empfindlichster Bereich  $0,15mV$ )

Universalmeßinstrument Voltcraft; Universalmeßinstrument Metravo 2

Drehspulinstrument Gossen Mavometer ( $1mA$  bzw.  $100mV$ ) mit  $1A$ -Shunt

Kästchen mit Vorschaltwiderständen ( $2 \times 1,2k\Omega$ )

Aufbewahrungsgefäß mit Probestäbchen (Fe; Al; Bi)

Zeißschiene mit Reitern, Stangen und Klemmen

#### **Literatur:**

Jedes Lehrbuch der Experimentalphysik ist geeignet.

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P1**

**Magnetfeldmessungen**  
**P1-80**

Versuchsvorbereitung von  
**Raphael Schmager**

Gruppe: Do-28

Druckgeführt am 10. November 2011

## 0 Grundlagen

### 0.1 Induktion

Unter Induktion versteht man das Entstehen einer Spannung durch ein sich änderndes B-Feld. Betrachtet wir eine Spule mit  $N$  Windungen durch die ein Magnetfeld  $\vec{B}$  hindurchgeht. Ändert sich nun die magnetische Flussdichte  $B$  bzw. der magnetische Fluss  $\Phi = BA$  durch herausziehen der Spule oder zeitliche Änderung des Feldes, wird eine Spannung in den Spulenden induziert.

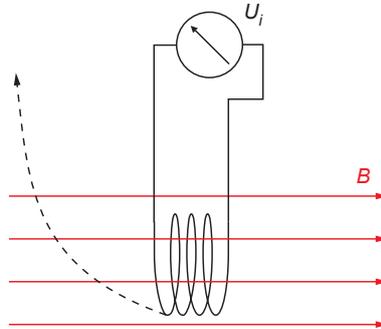


Abbildung 1: Induktionsspannung

Daraus folgt das Induktionsgesetz:

$$U_i = -N_i \dot{\Phi} \quad (1)$$

### 0.2 Induktivität

Ändert sich in einem stromdurchflossenen Leiter der Stromfluss  $I$ , so induziert diese Änderung des Flusses Spannung im Leiter, die der Änderung entgegenwirkt. Wir erhalten:

$$U_i = -N_i \dot{\Phi} = -L \dot{I} \quad (2)$$

$L$  ist die Induktivität der Spule. Diese berechnet sich durch:  $L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2}{l} A$ . Die Impedanz der Induktivität beträgt  $Z_L = i\omega L$ .

### 0.3 Hall-Effekt

Der Hall-Effekt tritt auf, wenn sich ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld befindet. Hierbei lenkt das Magnetfeld die Elektronen im Leiter ab. Auf Bewegte Elektronen wirkt im Magnetfeld die Lorentzkraft.

$$\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F_L = evB = F_{el} = eE_H = e \frac{U_H}{b} \quad (3)$$

Die dadurch erzeugte Spannung steht senkrecht auf dem Stromfluss  $\vec{I}$  und senkrecht auf dem Magnetfeld  $\vec{B}$ . Sie wird Hallspannung genannt:

$$U_H = \frac{1}{ne} \frac{I}{d} B = R_H \frac{I}{d} B \quad (4)$$

Durch eine Hallsonde kann man die Stärke eines Magnetfeldes bestimmt werden.

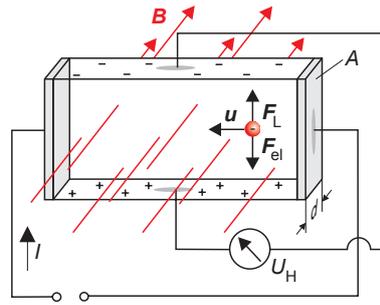


Abbildung 2: Hall-Effekt

## 0.4 Magnetische Materialien

### 0.4.1 Diamagnetismus

Liegt kein äußeres Feld an, so besitzen die Atome in einem Diamagnetischen Material kein magnetisches Moment. Diamagnete magnetisieren sich erst in einem externen Magnetfeld, dabei werden auf atomarer Ebene magnetische Dipole induziert. Das Magnetfeld in Ihrem Inneren schwächt sich proportional zum außen angelegten ab. Daher strebt diamagnetisches Material immer in Richtung niedrigerer Feldstärke. Zu den Diamagneten zählen alle Materialien mit negativer magnetischer Suszeptibilität.

### 0.4.2 Paramagnetismus

Paramagnetismus tritt auf, wenn es in einem Stoff viele ungepaarte Elektronen gibt. Damit besitzen die Atome oder Moleküle ein magnetisches Moment. Diese sind jedoch voneinander unabhängig. Im Mittel sind die magnetischen Momente so verteilt, dass sie sich nach außen hin aufheben. Wird nun ein äußeres Magnetfeld angelegt, so orientieren sich diese entsprechend. Paramagnete besitzen eine positive Suszeptibilität.

### 0.4.3 Ferromagnetismus

Ein Material ist ferromagnetisch, wenn sich im äußeren Magnetfeld eine unabhängige Magnetisierung zeigt. Im Vergleich zu den Paramagneten behalten die Ferromagnete ein Teil ihres Magnetfeldes, nach Abschalten des äußeren Feldes, bei. Sie haben eine sehr große (positive) magnetische Suszeptibilität. Ferromagnetische Materialien werden in den Bereich höhere Feldstärke gezogen.

## 0.5 Hysterese

Hysterese tritt bei ferromagnetischen Materialien auf. Bringt man ein entmagnetisiertes Material in ein Magnetfeld so steigt die magnetische Flussdichte in diesem. Erhöht man nun das umgebende Magnetfeld  $H$ , so steigt  $B$  im Stoff nur noch langsam an, bis eine Sättigungsgrenze erreicht ist. Das Verhalten bis hin zum Sättigungspunkt wird durch die Neukurve beschrieben. Wird das äußere Magnetfeld wieder langsam auf Null verringert, folgt das  $B$ -Feld im Inneren dieser Änderung.  $B$  fällt jedoch nicht auf Null zurück, sondern nur bis zur einer Restma-

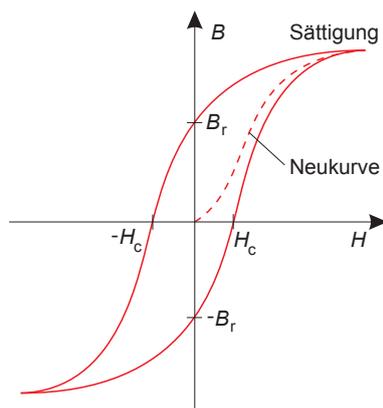


Abbildung 3: Hysteresekurve einer ferromagnetischen Probe

netisierung, welche Remanenz  $B_R$  genannt wird. Bei negativen Werten des äußeren Feldes verringert sich das innere Feld wieder, bis es an einem negativen Sättigungspunkt angekommen ist. Man erhält so eine geschlossene Kurve - die Hysteresekurve. Die Feldstärke, die benötigt wird, um das (ferromagnetische) Material wieder vollständig zu entmagnetisieren nennt man Koerzitivfeldstärke  $H_C$ .

## 1 Induktivität einer Spule

### 1.1 Entmagnetisierung des Kerns

Zur Entmagnetisierung eines Eisenkerns soll eine Spule mit 125+125 Windungen verwendet werden. Es soll bei geschlossenem Kern der maximale Wechselstrom von 0,75A durch die Spule fließen. Danach soll dieser langsam auf Null zurück geregelt werden. Da wir Wechselstrom verwenden, wird andauernd die Hysteresekurve durchlaufen. Durch das langsame herunterregeln des Stroms schafft man es die Remanenz allmählich zu verringern.

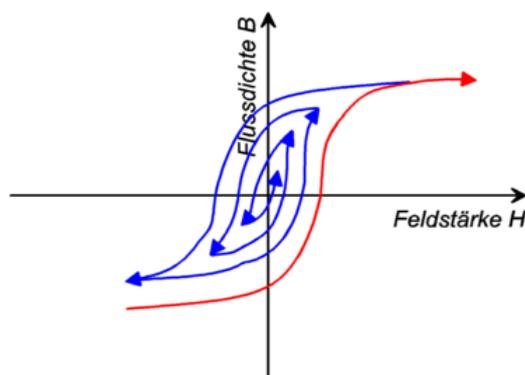


Abbildung 4: Durchlaufen der Hystereseschleife bis zur Entmagnetisierung

Da eine gute Entmagnetisierung wichtig ist, soll diese überprüft werden. Ob ein messbares Restmagnetfeld besteht lässt sich durch die Magnetfeldmessung mit einer Hall-Sonde oder eines

Kompasses zeigen.

## 1.2 Induktiver Widerstand in Reihe geschalteter Spulen

Nun sollen zwei Spulen mit je 1000 Windungen (sinnvoll) in Reihe geschaltet werden. Bei geschlossenem gemeinsamen Eisenkern soll der induktive Widerstand in Abhängigkeit des Spulenstroms berechnet werden. Der Induktive Widerstand einer Spule berechnet sich wie folgt:

$$U_L = L\dot{I} \quad \Rightarrow \quad U_L = L \cdot iwI_0 e^{i\omega t} = L \cdot iwI = Z_L \cdot I \quad (5)$$

Für die Betrag der Gesamtimpedanz (Scheinwiderstand) ergibt sich somit:

$$|Z_{Ges}| = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \sqrt{R^2 + R_L^2} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (6)$$

Um nun den induktiven Widerstand der Spulen zu berechnen müssen wir entweder den ohmschen Widerstand vernachlässigen oder er ist gegeben. Es soll dafür eine spannungsrichtige Schaltung verwendet werden: Des Weiteren soll die Permeabilität bestimmt werden. Diese folgt

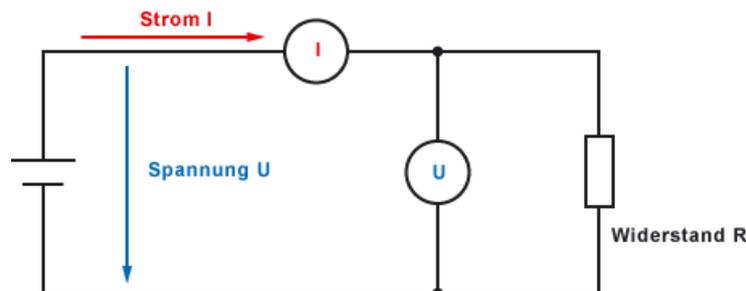


Abbildung 5: Spannungsrichtige Schaltung

aus Abschnitt 0.2.

$$L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2}{l} A \quad \Rightarrow \quad \mu_r = \frac{L \cdot l}{\mu_0 N^2} \quad (7)$$

## 1.3 Induktiver Widerstand mit Luftspalt

Nun wird die Messung wiederholt. Dabei wird der Eisenkern verändert. Zwischen U-Kern und Joch wird auf einer Seite eine 2mm Eisenplatte und auf der anderen Abstandsstück nicht-ferromagnetischem Material (gleicher Stärke) eingebracht. Dies entspricht einem Luftspalt ( $l_s = 2mm$ ).

In einem Diagramm soll die  $R_L(I)$ -Kurve aufgetragen werden. Anschließend soll der scheinbare Wert der Permeabilität bestimmt werden.

## 2 Hysterese

Im 2. Teil werden die Effekte durch Messung der Hystereseschleife genauer untersucht.

### 2.1 Messung mit der Hallsonde

Das Ziel ist es eine B(H)-Kurve für das verwendete Eisen zu erhalten. Dazu wird zunächst die B(I)-Kurve samt Neukurve gemessen. Ein 600Ω Widerstand soll mit den Spulen in Reihe geschaltet werden, um am Netzgerät den Spulengleichstrom I besser einstellen zu können. Schrittweise wird nun der Strom von 0A bis +40mA erhöht. Danach allmählich auf -40mA verringert. Und als letztes wieder auf +40mA erhöht.

Es muss aufgepasst werden, da die so erhaltene B(I)-Kurve nicht durch lineare "Umskalierung" in die Hystereseschleife transformiert werden kann. Der Luftspalt ist zu berücksichtigen. Es gilt:

$$H_S l_S + H l = n I \quad (8)$$

Mit dem  $H_S = \frac{B}{\mu_0}$ , dem Wert im Spalt, der Feldlinienlänge  $l_S$  im Spalt, dem H-Wert des Eisens und der Feldlinienlänge im Eisen  $l$  ergibt sich mit der Stetigkeitsbedingung ( $B_{Eisen} = B_{Spalt} = B$ ) folgender Zusammenhang.

$$H = \frac{n}{l} \left( I - \frac{l_S}{n \mu_0} B \right) = \frac{n}{l} \cdot I_{korrr} \quad (9)$$

Nun muss bei jedem Wertepaar (I,B) jeweils von der Stromstärke I ein zu B proportionaler Anteil subtrahiert werden. Dies nennt man Scherung. Die Scherung dient dazu, den Einfluss des Spalts zu eliminieren.

Anschließend soll aus der mittleren Steigung der nicht korrigierten Schleife die scheinbare relative Permeabilität berechnet und mit dem Ergebnis aus Aufgabe 1.3 verglichen werden. Für die korrigierte Schleife soll gleiches gemacht werden und anschließend mit Aufgabe 1.2 verglichen werden.

### 2.2 Wiederholung der Messung (nun bis ±1,2A)

Der in Reihe geschaltete Widerstand aus Aufgabe 1.2 soll entfernt werden und die Messung bis zu einem Strom von ±1,2A gemessen werden. Es ist erneut eine Scherung durchzuführen und mit Aufgabe 2.1 zu vergleichen.

Danach soll die Verlustleistung im Kern bei der Annahme eines 50Hz-Betriebs mit Hilfe der Schleifenfläche berechnet werden. Außerdem soll die Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivkraft bestimmt werden.

## 3 Magnetische Feldstärke in stromdurchflossenen Zylinderspulen

### 3.1 Eichen der Longitudinalfeld-Hallsonde

Wir haben eine Kalibrierspule, die bei einem Spulenstrom von 0,96A in der Mitte ein Minimum es B-Feldes von 10mT aufweist. Dieses Minimum soll mit einer Logitudinalfeld-Hallsonde

bestimmt werden. Der Steuerstrom ist auf 120mA zu stellen.

Es wird das Minimum der Spannung im inneren der Spule gemessen. Durch den oben erläuterten Zusammenhang zwischen Hallspannung und Strom ergibt sich:

$$U_H = R_H \frac{I}{d} B = k \cdot B \quad \Rightarrow \quad k = \frac{U_H}{B} \quad (10)$$

Mit der nun geeichten Sonde kann die Magnetfeldmessung im nächsten Aufgabenteil vollzogen werden.

### 3.2 Magnetfeldmessung der Zylinderspule

Das Magnetfeld einer Zylinderspule soll längs der Achse innerhalb sowie außerhalb gemessen werden. Dabei wird die geeichte Hall-Sonde aus der vorigen Aufgabe verwendet. Die Messwerte der Hallspannung sollen wie auch Werte der Geometrie in eine Tabelle eingetragen werden.

Das Magnetfeld einer Spule kann mit dem Biot-Sarvat-Gesetz berechnet werden:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} (d\vec{l} \times \vec{r}) \quad \Rightarrow \quad B(z) = \frac{NI\mu_0}{2l} \left( \frac{z + \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + (z + \frac{l}{2})^2}} - \frac{z - \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + (z - \frac{l}{2})^2}} \right) \quad (11)$$

Die letzte Gleichung ergibt sich aus der Superposition der Magnetfelder der einzelnen stromdurchflossenen "Kreisringe".

## 4 Wirkung eines inhomogenen Magnetfeld

Zum Abschluss des Versuchs sollen die Auswirkungen eines inhomogenen Magnetfeldes auf dia-, para- und ferromagnetische Körper untersucht werden. Die Beschreibung der drei magnetischen Materialien fand in der Grundlagen zu Beginn der Vorbereitung statt. Es ist:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H} \quad (12)$$

## 5 Quellen

- H. J. Eichler H.-D. Kronfeldt J. Sahn, Das Neue Physikalische Grundpraktikum, 2. Auflage, Springer-Verlag
- Vorbereitungsmappe
- Zur Entmagnetisierung:  
<http://forum.watchtime.ch/viewtopic.php?f=17&t=42933> (Mo, 07.11. 21:00Uhr)
- Stromrichtige Schaltung:  
<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/grd/0201113.htm> (Mo, 07.11. 22:00Uhr)

## Physik Praktikum 1

# Magnetfeldmessungen

Tobias Renz

Matrikel Nr. 1581784

10. November 2011

Versuchsvorbereitung

# Grundlagen

Bevor ich die auf die einzelnen Aufgaben eingehe, möchte ich zu Beginn die Hall-Sonde und die Hysteresekurve erläutern.

## 0.1 Hall-Sonde

Eine Hall-Sonde dient zur Messung der Stärke des Magnetfeldes und wird bei diesem Versuch häufig verwendet. Der Hall-Effekt basiert auf der Lorentz-Kraft, die eine Ablenkung der Ladungsträger eines Leiters senkrecht zum Magnetfeld und zur Stromrichtung bewirkt ( $\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$ ). Die Ablenkung führt zur Ladungstrennung im Leiter, so dass ein elektrisches Feld entsteht. Die Ladungstrennung dauert so lange bis das elektrische Feld eine gleiche große entgegengesetzte Kraft auf die Ladungsträger bewirkt ( $qE = F_L$ ). Durch Messung der Spannung des elektrischen Feldes ( $U_H$ ) kann dann die Stärke des Magnetfeldes bestimmt werden.

Aus der Bedingung:  $q \cdot \vec{E} = -q(\vec{v} \times \vec{B})$  folgt mit der Stromdichte  $\vec{j} = n \cdot q \cdot \vec{v}$  ergibt sich die Hallspannung zu:

$$U_H = -\frac{j \cdot B \cdot b}{n \cdot q}$$

In Metallen und den meisten Halbleitern sind die Ladungsträger Elektronen ( $q = -e$ ) und mit  $I = j \cdot A = j \cdot b \cdot d$  ergibt sich die Hallspannung zu:

$$U_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot e \cdot d} = R_H \frac{I \cdot B}{d} \text{ mit } R_H = \text{Hall-Koeffizient.}$$

## 0.2 Hysteresekurve

Bei ferromagnetischen Materialien (magnetische Suszeptibilität  $\gg 1$ ) tritt Hysterese auf. Hysterese bedeutet, dass die Magnetisierung nicht nur von dem äußeren Magnetfeld abhängt, sondern auch von der Vorbehandlung des Materials. Hat man ein völlig entmagnetisiertes Material und legt ein äußeres Magnetfeld an steigt die Magnetisierung zuerst linear an und geht dann in die Sättigung über. Fährt man das Magnetfeld wieder zurück verläuft die Magnetisierung über einer anderen Kurve bis bei entsprechend großem entgegengesetzten Feld wieder Sättigung erreicht wird. Man kann das äußere Feld wieder ändern wird aber nicht mehr auf die erste Kurve (Neukurve) gelangen. Man erhält eine

geschlossene Kurve, die Hysteresekurve. Die Restmagnetisierung (bei äußerem Feld =0) heißt Remanenz, die Feldstärke die benötigt wird um die verbleibende Magnetisierung zu beseitigen heißt Koerzitivkraft.

Man trägt nun normalerweise das entstehende B-Feld über der äußeren magnetischen Erregung auf.

Dieser Effekt liegt an den sogenannten Weißschen Bezirken in ferromagnetischen Materialien. Diese Bezirke werde durch ein äußeres Feld ausgerichtet und das Material wird magnetisch. Wird das äußere Feld nun abgeschaltet bleiben diese Bezirke ausgerichtet.

# 1 Induktivität einer Eisenkernspule

## 1.1 Entmagnetisierung eines Kerns

Zu Beginn des Versuchs soll zuerst ein Kern vollständig entmagnetisiert werden. Dazu wird der Kern in eine Spule gebracht und an die Spule den maximal möglichen Wechselstrom angelegt und der Strom dann langsam auf null herunter geregelt. Durch anlegen des Wechselstroms wird ständig eine Hystersekurve durchlaufen. Durch das herunter regeln des Wechselstroms nimmt die Remanez auch ab und man sollte ein entmagnetisiertes Material erhalten.

Es soll dann noch getestet werden ob das Material wirklich entmagnetisiert ist. Dies kann man zum Beispiel mit Sägespäne oder einer Hall-Sonde getestet werden.

## 1.2 Induktiver Widerstand bei geschlossenem Kern

Es soll der induktive Widerstand zweier in Reihe geschalteter Spulen mit je 1000 Windungen bei geschlossenem gemeinsamen Eisenkern in Abhängigkeit vom Spulenstrom gemessen werden.

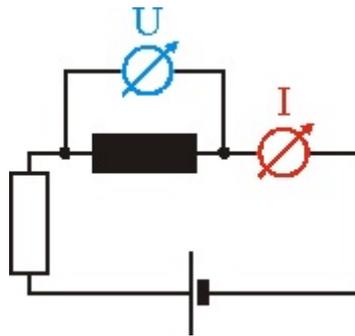
Die Induktionsspannung ist proportional zur Induktivität ( $U_{ind} = -L\dot{I}$ ). Die Impedanz einer Induktivität ( $Z_L$ ) beträgt  $Z_L = i\omega L$ .

Der Betrag der Spannung ergibt sich aus  $|U| = |Z| \cdot |I|$ . Das heißt aus Messungen von U und I kann die Induktivität der Spulen gemessen werden. Dazu muss aber der ohmsche

Widerstand vernachlässigt werden oder bekannt sein, da er in  $|Z|$  rein spielt.  $R_L$  wird dann über  $\frac{U}{I}$  berechnet und in einem Diagramm soll die  $R_L(I)$  Kurve aufgetragen werden.

Es soll beim größten Messwert die Induktivität berechnet werden und daraus die wirksame relative Permeabilität ( $\mu_R$ ) Die Induktivität einer langen Spule kann auch theoretisch über  $L = \mu_R \cdot \mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot A$  berechnet werden. Daraus kann dann  $\mu_R = \frac{l \cdot L}{\mu_0 \cdot A \cdot N^2}$

Es soll mit einer spannungsrichtigen Schaltung gemessen werden. Eine spannungsrichtige Schaltung ist folgendermaßen aufgebaut:



### 1.3 Induktiver Widerstand mit Luftspalt

Es soll nun die gleiche Messung wie in 1.2 durchgeführt werden aber dieses mal mit einem 2mm breitem Luftspalts zwischen U-Kern und Joch. Auch hier soll dann ein  $R_L(I)$  Diagramm gezeichnet werden und der nun scheinbare Wert der Permeabilität berechnet werden.

## 2 Messung von Hystereseschleifen

### 2.1 Messung einer B(H) Kurve im Luftspalt

Das Ziel ist es eine B(H) Kurve für das verwendete Eisen zu bekommen. Dazu wird mit Hilfe einer Hallsonde zunächst im Luftspalt eine B(I) Kurve samt Neukurve gemessen. Um den Spulengleichstrom besser einstellen zu können wird noch ein  $600\Omega$  Widerstand zu den Spulen in Serie geschaltet. Um eine Neukurve zu bekommen benötigen wir nun

den in 1.1 entmagnetisierten Kern. Es wird nun von Null an der Strom schrittweise auf +40mA gesteigert, dann wieder auf -40mA gesenkt und wieder auf +40mA gesteigert. Es kann jetzt aber nicht durch einfaches Umskalieren die Kurve in eine Hysteresekurve umgewandelt werden, da  $H = \frac{N \cdot I}{l}$  nicht gilt. Aus der Stetigkeit der Normalkomponente des B-Feldes und dem Ampèreschen gesetz für das H Feld folgt:

$$B_{Fe} = B_S = B \text{ und } H_s \cdot l_s + H_{Fe} \cdot (l - l_s) \approx H_s \cdot l_s + H_{Fe} \cdot l = N \cdot I$$

Mit  $H_s = \frac{B}{\mu_0}$  folgt:

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

Es muss also von jedem (I,B) Wertepaar ein zu B proportionaler Anteil subtrahiert werden, um den Einfluss des Spaltes zu eliminieren. Dies nennt man eine Scherung. Solch eine Scherung sollen für unsere Werte ausführen um eine B(H) Kurve zu bekommen. Aus der mittleren Steigung der nicht korrigierten Schleife soll die scheinbare Permeabilität gemessen werden und mit 1.3 verglichen werden. Die relative Permeabilität aus der korrigierten Schleife soll dann noch mit 1.2 verglichen werden.

Es soll nun noch die Verlustarbeit berechnet werden. Zur Änderung des Feldes ist die Arbeit  $W = \int_{H_1}^{H_2} B dH$ . Berechnet man die Arbeit für einen vollen Umlauf, so ergibt sich, dass die von der Kurve umschlossene Fläche die Verlustarbeit pro Volumenarbeit darstellt. Bei Wechselstrom ist die Verlustleistung  $P = V \cdot A \cdot f$

## 2.2 Messung ohne Widerstand

Es soll die selbe Messung wie in 2.1 durchgeführt werden. Es soll jedoch bis  $\pm 1,2$  A gemessen werden. Dies erreicht man indem man die Messung ohne den Widerstand durchführt. Es soll dann wieder eine Scherung durchgeführt werden und mit 2.1 verglichen werden. Es soll auch eine Verlustleistung berechnet werden und zusätzlich die Sättigungsmagnetisierung, die Remanenz und die Koerzitivkraft bestimmt werden.

## 3 Zylindrische Spulen

### 3.1 Eichung einer Longitudinalfeld-Hallsonde

Es soll eine Hallsonde mit Hilfe einer Kalibrierspule geeicht werden. Das Magnetfeld der Spule weist im Zentrum aufgrund eines Windungsspalt es ein Minimum von 10mT bei einem Spulenstrom von 0,96A auf. Es soll dabei bei einem Steuerstrom von 120mA gemessen werden. Die Hallspannung  $U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d} = c \cdot B$ . Aus den Messwerten von  $U - H$  kann dann die Konstante  $c$  bestimmt werden.

### 3.2 Magnetfeld einer Zylinderspule

Es soll das Magnetfeld einer Zylinderspule mit Hilfe der Hallsonde vermessen werden und mit den theoretisch berechneten Werte verglichen werden.

Das Magnetfeld einer Spule kann mit dem Biot-Savartschen Gesetz berechnet werden.

Biot-Savart-Gesetz:  $d\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot r^3} \cdot (d\vec{l} \times \vec{r})$   
Feld einer Spule:  $B(z) = \frac{NI\mu_0}{2L} \left[ \frac{z + \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + (z + \frac{L}{2})^2}} - \frac{z - \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + (z - \frac{L}{2})^2}} \right]$   
(wobei  $N$  = Anzahl der Windungen,  $R$  = Radius der Spule und  $L$  = Länge der Spule)

## 4 Inhomogenes Magnetfeld

In diesem Teil des Versuchs soll die Wirkung eines inhomogenen Magnetfeldes auf dia-, par- und ferromagnetische Körper getestet werden.

Befindet sich Materie im Magnetfeld, ist  $\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H}$ . Mit  $\chi$  = magnetische Suszeptibilität. Nach dem Wert und Vorzeichen von  $\chi$  werden nun Materialien in folgende drei Klassen eingeteilt.

- Diamagnetische Stoffe haben eine magnetische Suszeptibilität kleiner als 0. Sie bestehen aus Atomen oder Molekülen, die kein permanentes Dipolmoment. Bringt man sie aber in ein Magnetfeld werden Dipole induziert, die dem äußeren Feld ent-

gegen gerichtet sind. In inhomogenen Feldern werden Diamagnete aus dem Bereich hoher Feldstärken hinausgedrängt.

- Paramagnetische Stoffe besitzen ein positives  $\chi$ , das aber kleiner als 1 ist. Paramagnete besitzen Atome mit permanenten Dipolen. Diese Dipole sind aber aufgrund der thermischen Bewegung in alle Richtungen gleich orientiert. Legt man ein äußeres Feld an so werden die Dipole teilweise ausgerichtet. In einem inhomogenen Feld werden Paramagnete in Richtung höherer Feldstärken gezogen.
- Ferromagnetische Materialien haben eine magnetische Suszeptibilität, die viel größer als 1 ist. Ferromagnete besitzen auch ohne äußeres Feld magnetische atomare Dipole, die in makroskopischen Raumbereichen (Domänen) parallel ausgerichtet sind. Legt man nun ein äußeres Feld an werden die Domänen durch Drehung oder Verschiebung so ausgerichtet, dass das gesamte Material Magnetisiert ist. Ferromagnete werden in Inhomogenen Feldern stark in Richtung der höheren Feldstärken gezogen.

## 5 Quellen

- Demtröder, Experimentalphysik 2 1995
- <http://www.imn.htwk-leipzig.de/physics/praktikum/anleitung/e4.pdf>
- [http://www.leifiphysik.de/web\\_p10/musteraufgaben/04\\_widerstand/strom\\_spannung\\_lichtig/s](http://www.leifiphysik.de/web_p10/musteraufgaben/04_widerstand/strom_spannung_lichtig/s)

**Physikalisches Anfängerpraktikum - P1**

**Magnetfeldmessungen**  
**P1-80**

Protokoll von  
**Tobias Renz** und **Raphael Schmager**

Gruppe: Do-28

Versuchsdatum: 10. November 2011

# 1 Induktivität einer Eisenkernspule

## 1.1 Entmagnetisierung des Kerns

Für die nachfolgenden Aufgaben benötigen wir einen entmagnetisierten Eisenkern. Den Kern haben wir vor jeder neuen Aufgabe nach folgendem Prinzip entmagnetisiert. Wir haben bei geschlossenem Kern mit einer Spule den maximal möglichen Wechselstrom fließen lassen. Bei uns war die maximal erreichte Stromstärke bei 350mA. Die Stromstärke haben wir dann in einer Zeit von 2 bis 3 Minuten auf null herunter geregelt. Durch diese Methode sollten wir eine Magnetisierung von Null erreichen. Nun haben wir mit Hilfe eines Abstandsplättchen einen Luftspalt in den Kern gebracht und dort das Magnetfeld gemessen. Dort hatten wir einen Wert zwischen 0,5 und 0,6mT. Die Magnetisierung verschwindet nicht ganz, aber die Methode bringt ein ganz gutes Ergebnis.

## 1.2 Induktiver Widerstand bei geschlossenem Kern

Wir sollten den induktiven Widerstand  $R_L$  zweier Spulen mit je 1000 Windungen messen. Die Spulen wurden so in Reihe geschaltet, dass sich die Magnetfelder der Spule im Kern addieren. Über eine spannungsrichtige Schaltung haben wir dann die Spannung an den Spulen und den Strom durch die Spulen gemessen. Da wir den Verlustwiderstand vernachlässigen können ergibt sich der induktive Widerstand sofort aus  $R_L = \frac{U}{I}$ .

U / V	I / mA	R / kΩ
5	1,53	3,27
10	2,46	4,07
15	3,26	4,60
20	3,94	5,08
25	4,54	5,51
30	5,1	5,88

Tabelle 1: induktiver Widerstand bei geschlossenem Kern

Aus dem Messwert beim höchsten Messstrom soll jetzt noch die Induktivität und die relative Permeabilität berechnet werden. Die Induktivität ergibt sich aus  $L = \frac{R_L}{2\pi \cdot f}$  und die Permeabilität ergibt sich aus

$$\mu_R = \frac{l \cdot L}{\mu_0 \cdot A \cdot N^2} \quad (1)$$

Mit  $f = 50\text{Hz}$ ,  $A = 0,00156\text{m}^2$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$  und  $l = 48\text{cm}$ . Mit unserem Messwert ergibt sich dann  $L = 18,7\text{H}$  und  $\mu_R = 1144,7$ .

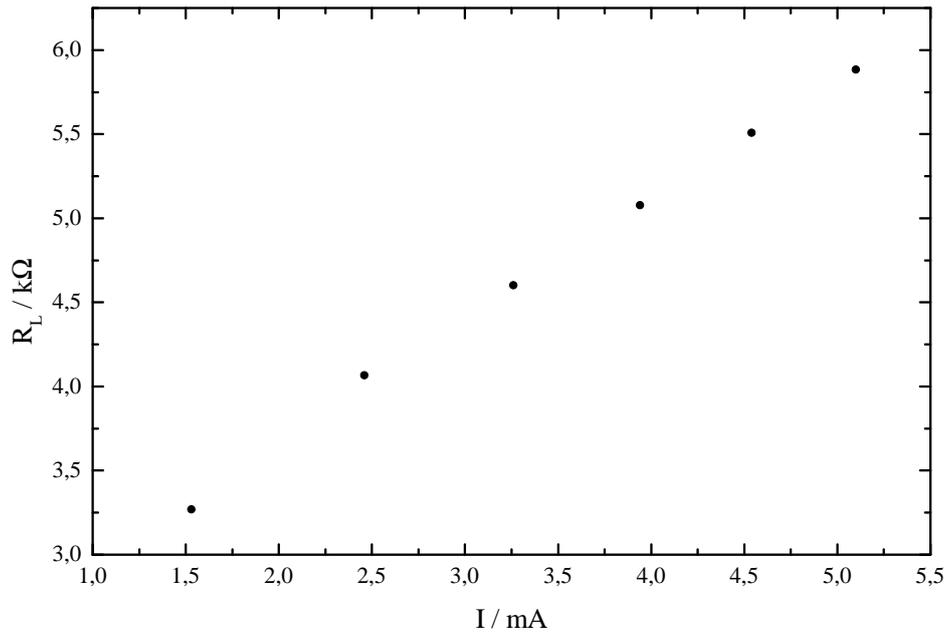


Abbildung 1: Induktioniver Widerstand bei geschlossenem Kern

### 1.3 Induktiver Widerstand mit Luftspalt

Bei dieser Messung haben wir nun einen Luftspalt von 2mm in den Kern eingefügt und die Messung analog zu 1.2 durchgeführt. Aus unserem Messwert mit dem größten Messstrom berechnen wir nun die Induktivität und die scheinbare Permeabilität. Die Induktivität ergibt sich zu  $L = 4,49H$  und die Permeabilität zu  $\mu_R = 274,8$ .

U / V	I / mA	R / kΩ
5	4,34	1,15
10	7,99	1,25
15	11,44	1,31
20	14,78	1,35
25	18,08	1,38
30	21,25	1,41

Tabelle 2: induktiver Widerstand mit Luftspalt

Wenn man die Induktivität und den induktiven Widerstand theoretisch für eine lange Spule berechnet (siehe Vorbereitung) erwartet man einen konstanten Wert für den induktiven Widerstand. Man erkennt aber in beiden Schaubildern, dass der induktive Widerstand nicht konstant ist. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass bei steigendem Strom die Magnetisierung und somit auch die Induktivität steigt.

Man entnimmt aus den Schaubildern, dass der induktive Widerstand für die Spulen mit geschlossenem Kern deutlich höher ist als für den Kern mit Luftspalt. Dies ist auch verständlich,

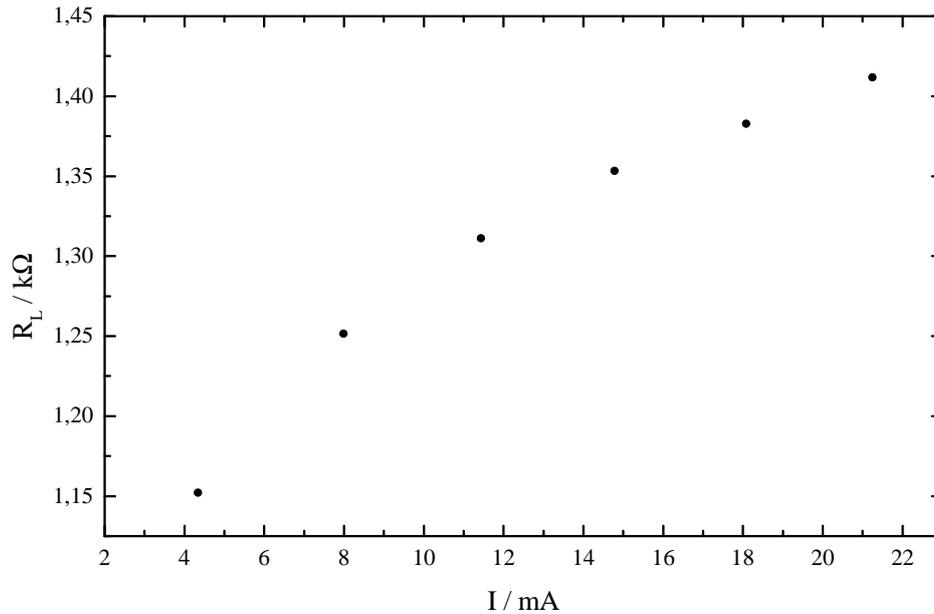


Abbildung 2: Induktioniver Widerstand bei Kern mit Luftspalt

da dass Magnetfeld im Kern stark absinkt wenn ein Luftspalt vorhanden ist.

## 2 Hysterese

### 2.1 Messung einer B(H) Kurve im Luftspalt

Um die Hysteresekurve zu bekommen, haben wir den Eisenkern entmagnetisiert und mit einem Vorwiderstand in Reihe geschaltet. Für den Widerstand haben wir einen  $1,2\text{k}\Omega$  und einen  $1\text{k}\Omega$  Widerstand parallel geschaltet. Dann haben wir das B-Feld im Luftspalt in Abhängigkeit der Stromstärke gemessen. Die Messwerte, sowie die daraus berechneten Werte befinden sich im Anhang. Die erhaltene B(I) Kurve muss dann noch wie in der Vorbereitung beschrieben geschert werden. Wir haben nun die gescherte B(H) Kurve und die ungescherte B(H) Kurve dargestellt.

Nun sollte noch aus der mittleren Steigung der nicht korrigierten Schleife die scheinbare relative Permeabilität und aus der korrigierten die relative Permeabilität bestimmt werden.

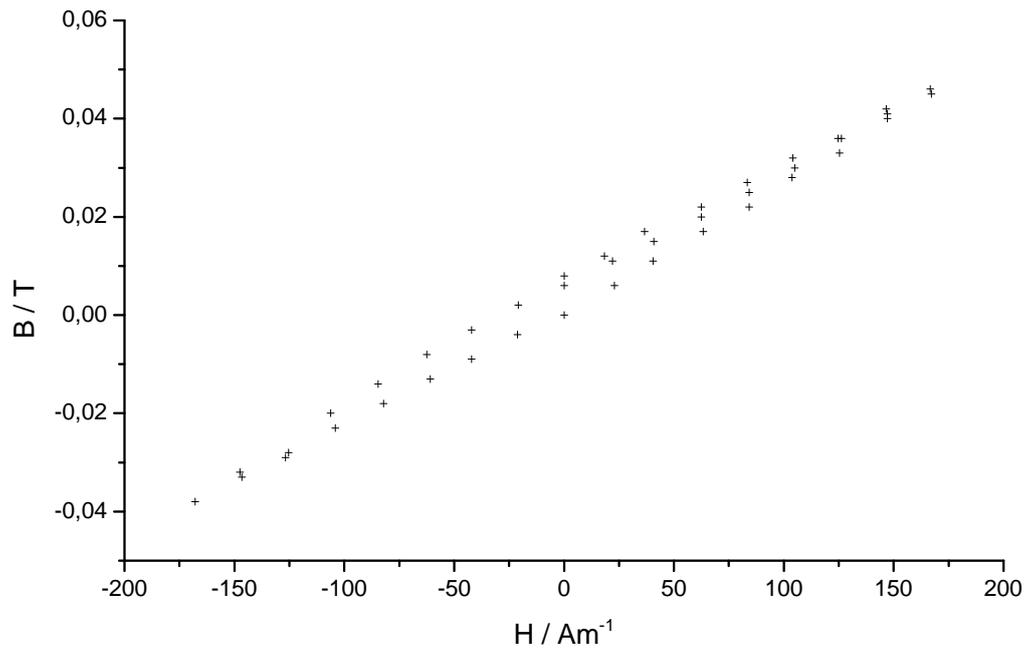


Abbildung 3: Hysteresekurve Aufgabe 2.1

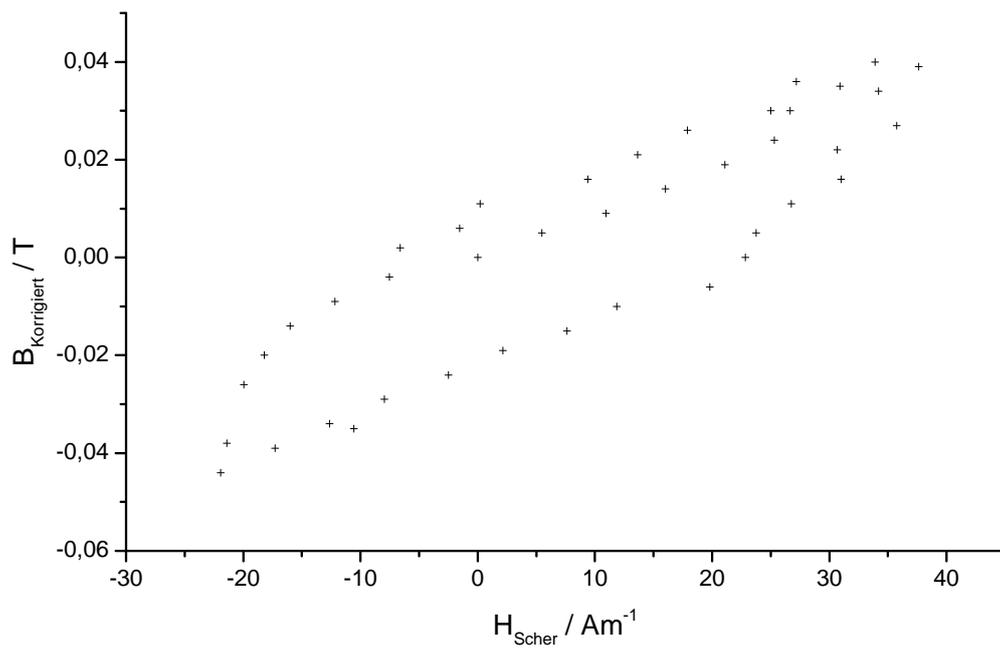


Abbildung 4: Gescherte Hysteresekurve Aufgabe 2.1

Die Steigung der Ausgleichsgeraden entspricht gerade  $\mu_0 \cdot \mu_R$ . Wir erhalten dann für  $\mu_R = 197,35$  (unkorrigiert) und  $\mu_R = 907,2$  (korrigiert). Vergleicht man diese Werte mit 1.2 und 1.3

ergibt sich für die relative Permeabilität entspricht korrigiertem Wert) ein Abweichung von ca. 26% und für die scheinbare relative Permeabilität (entspricht unkorrigiertem Wert) eine Abweichung von ca. 39%.

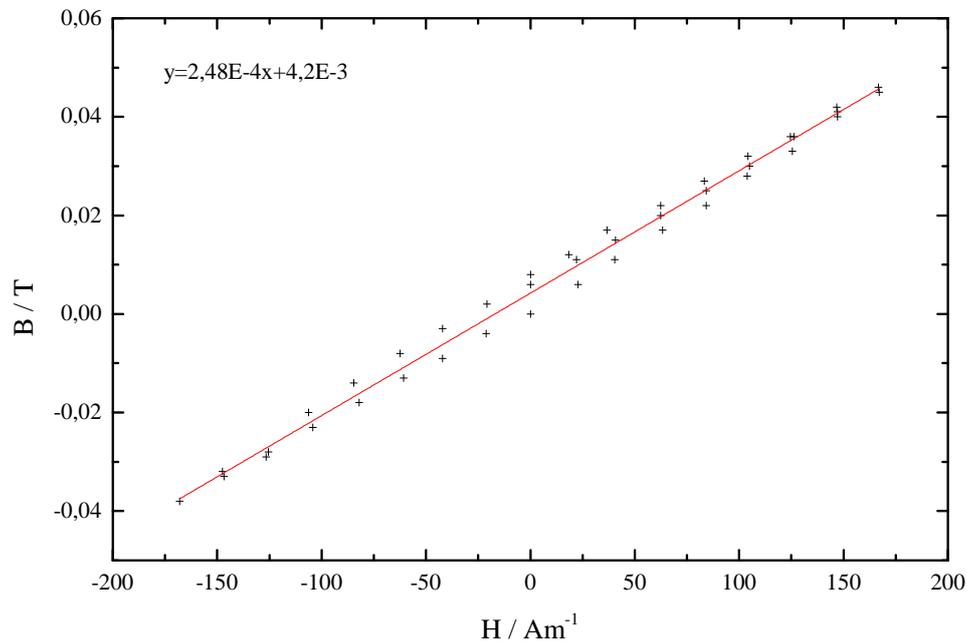


Abbildung 5: Hysteresekurve Aufgabe 2.1 mit linearer Regression

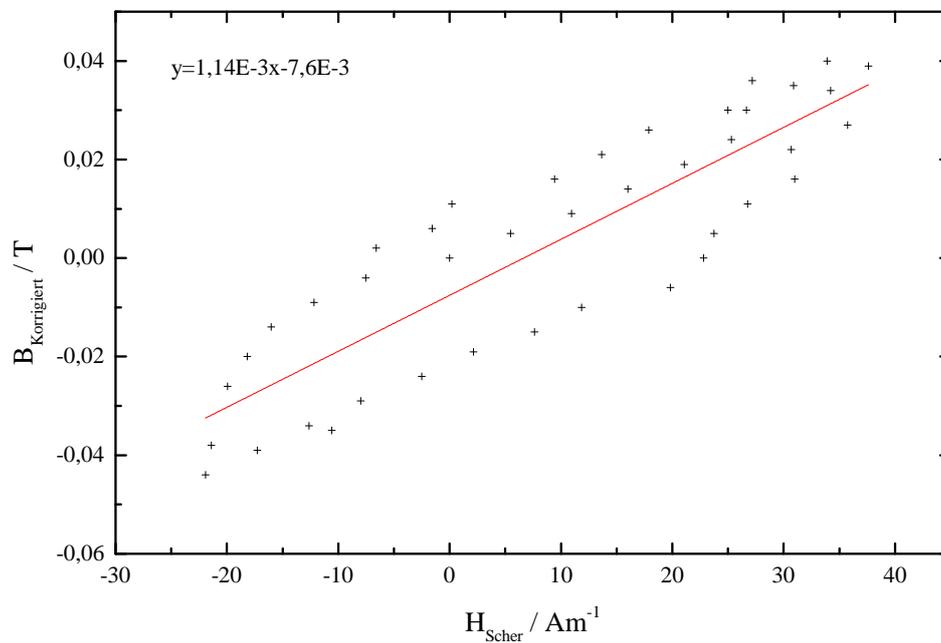


Abbildung 6: Gescherte Hysteresekurve Aufgabe 2.1 mit linearer Regression

Aus der Schleifenfläche ( $A_i$ ), dem Volumen des Kerns  $V = 7,488 \cdot 10^{-4} m^3$  und der Frequenz ( $f$ ) von 50Hz kann nun noch die Verlustleistung über  $P_i = V \cdot A_i \cdot f$  berechnet werden.

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \int_{-175}^{175} ((2,48 \cdot 10^{-4}x - 1,38 \cdot 10^{-7}x^2 + 1,65 \cdot 10^{-10}x^3 + 0,00754901) \\
 &\quad - (2,41 \cdot 10^{-4}x + 1,12 \cdot 10^{-7}x^2 + 2,45 \cdot 10^{-10}x^3 + 9,17 \cdot 10^{-4}))dx \\
 &= 1,43Pa
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 A_{1_{Scher}} &= \int_{-22}^{38} ((0,00669895 + 0,00133029x - 2,20991 \cdot 10^{-5}x^2 + 3,6088 \cdot 10^{-7}x^3) \\
 &\quad - (-0,0220234 + 7,64377 \cdot 10^{-4}x + 1,19315 \cdot 10^{-8}x^2 + 5,9449 \cdot 10^{-7}x^3))dx \\
 &= 1,40Pa
 \end{aligned} \tag{3}$$

Daraus ergeben sich die beiden Werte der Verlustleistung zu:  $P_1 = 0,054W$  und  $P_{1_{Scher}} = 0,052W$ .

## 2.2 Messung ohne Widerstand

In diesem Aufgabenteil wird die gleiche Messung wie in 2.1 durchgeführt, nur dass wir den Vorwiderstand weg gelassen haben und somit die Stromstärke nicht mehr zwischen ca.  $\pm 40mA$  sondern zwischen ca.  $\pm 1,2 A$  variiert. Wir messen also in diesem Teil bei einem deutlich

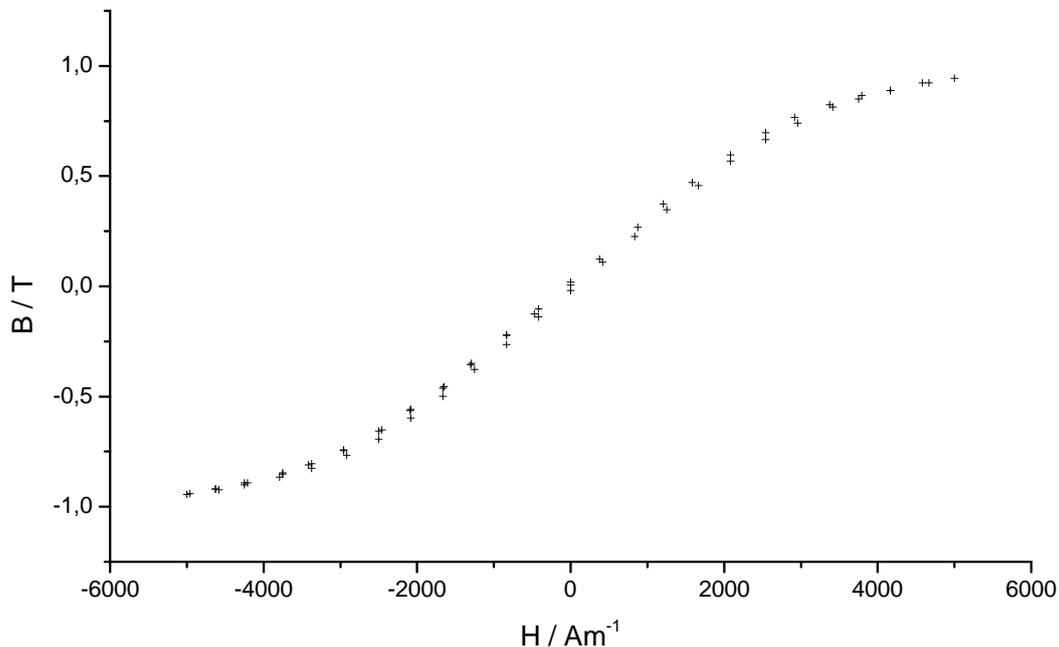


Abbildung 7: Hysteresekurve Aufgabe 2.2

stärkerem Strom. Wir haben auch hier eine nicht korrigierte  $B(H)$  Kurve und eine gescherte  $B(H)$  Kurve dargestellt.

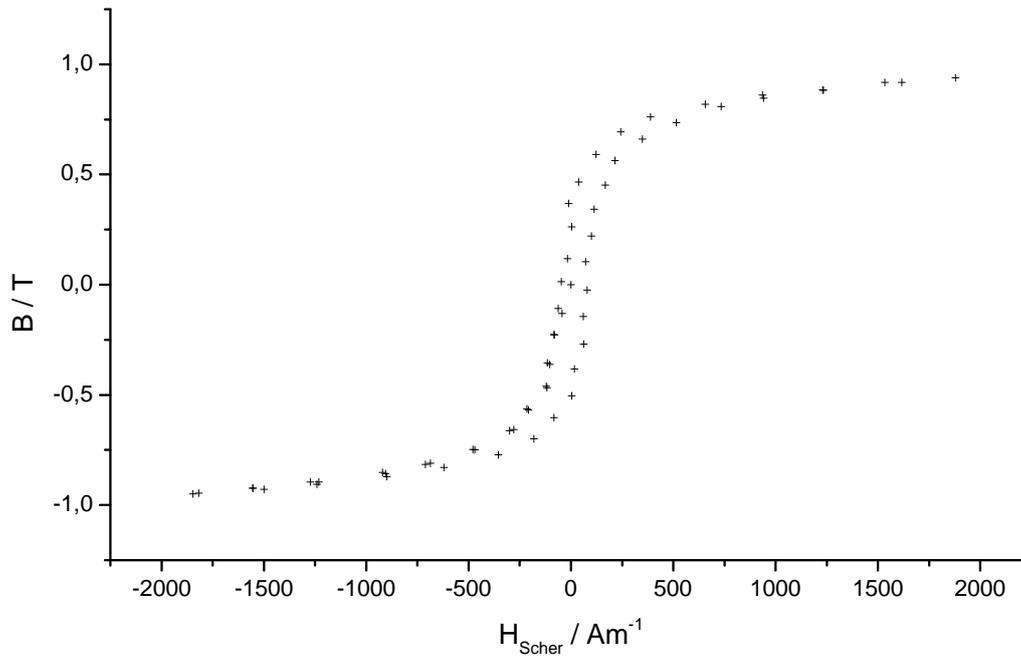


Abbildung 8: Gescherte Hysteresekurve Aufgabe 2.2

Man sieht im Vergleich zu 2.1 das hier die Sättigungsmagnetisierung erreicht würde. In 2.1 wurde dagegen nur ein Ausschnitt der gesamten Hysteresekurve aufgenommen. Da in 2.2 die Sättigungsmagnetisierung erreicht wurde macht es bei dieser Kurve auch keinen Sinn die Permeabilität zu bestimmen, da bei Erreichen der Sättigung durch das Eisen keine Verstärkung mehr zustande kommt.

Nun soll auch noch die Verlustleistung im Kern berechnet werden. Leider war es nur möglich 2 Kurven für den ungescherten Fall zu Fitten. Das Integral hierüber ergibt wieder die Fläche:

$$\begin{aligned}
 A_2 &= \int_{-5000}^{5000} ((0.0194898 + 2.92293 \cdot 10^{-4}x + 7.88227 \cdot 10^{-10}x^2 - 4.31255 \cdot 10^{-12}x^3) \\
 &\quad - ((-0.0193812 + 2.93519 \cdot 10^{-4}x + 8.20665 \cdot 10^{-10}x^2 + 4.3462 \cdot 10^{-12}x^3)) dx \\
 &= 254.636 Pa
 \end{aligned} \tag{4}$$

Bei der gescherten konnte Origin v8.5.1G keine Kurve finden. Es wurde versucht manuell ein  $\tanh()$  anzupassen, jedoch waren die Abweichungen noch so groß, das es keinen Sinn gemacht hätte dies für obere und untere Kurve durchzuführen.

Aus der Fläche  $A_2$  folgt die Verlustleistung:  $P = 9,48W$

Aus dem Schaubild können wir nun die Sättigungsmagnetisierung, die Remanenz und die Koerzitivkraft ablesen. Alle Werte sind im folgenden Schaubild mit aufgeführt.

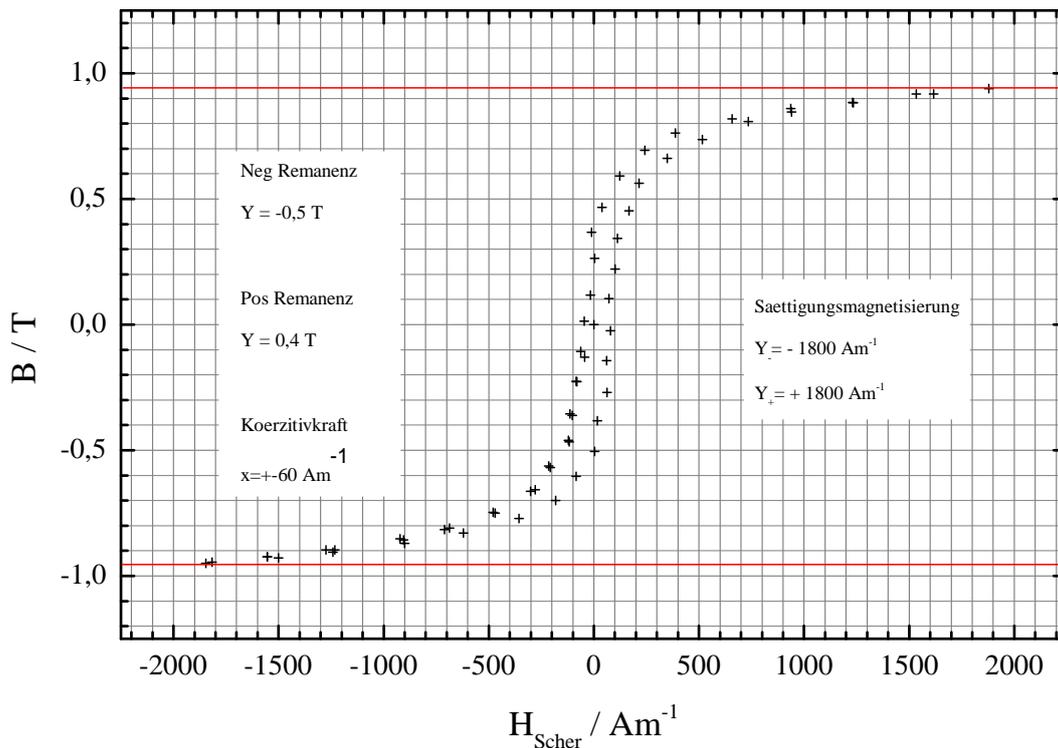


Abbildung 9: Hysteresekurve mit Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivkraft

Die Messwerte, sowie die daraus berechneten Werte befinden sich im Anhang.

### 3 magnetische Feldstärke in stromdurchflossenen Zylinderspulen

#### 3.1 Eichung einer Longitudinalfeld-Hallsonde

Zur Eichung der Hallsonde stand eine Kalibrierspule zur Verfügung. Diese Spule hat in der Mitte ein Minimum von 10mT. Nun haben wir bei unsere Hallsonde eine Steuerstrom von 112mA eingestellt und mit der Sonde das Magnetfeld in der Spule abgefahren. Beim minimalen Magnetfeld muss auch die minimale Spannung bei der Hallsonde angezeigt werden. Wir haben nun das Spannungsminimum in der Hallsonde gesucht. Wir haben eine Spannung von 0,65mV als Minimum gefunden. Daraus können wir nun die Konstante  $c$  in der Gleichung  $U_H = c \cdot B$  bestimmen. Für  $c$  ergibt sich ein Wert von  $0,065 \frac{\text{V}}{\text{T}}$ .

#### 3.2 Magnetfeld einer Zylinderspule

Es sollte das Magnetfeld einer Zylinderspule gemessen werden und mit den theoretisch berechneten Werten verglichen werden. Das Magnetfeld haben wir mit der in 3.1 geeichten Hallsonde vermessen und immer eine Spannung bei einer bestimmten Position gemessen. Über  $B = \frac{U_H}{c}$

wird dann das zugehörige Magnetfeld bestimmt. Da wir bei der Berechnung des Magnetfeldes mit dem Biot-Savart-Gesetz vom Mittelpunkt der Spule ausgehen, haben wir unsere Messwerte so angepasst, dass auch sie vom Mittelpunkt der Spule aus gemessen werden, damit wir unsere Ergebnisse besser vergleichen können.

Da unsere Spule warm wurde, hat sich unser Strom während der Messung verändert. Um das B-Feld mit dem Biot-Savart-Gesetz zu berechnen, benötigen wir aber den Strom durch die Spule. Um dieses Problem zu lösen haben wir den Strom zu Beginn des Versuchs gemessen und am Schluss. Zu Beginn also bei einem Abstand von 21,9cm zum Spulenmittelpunkt hatten wir einen Strom von 1,98A. Am Ende unsere Messreihe, bei einem Abstand von -23,1cm von der Spulenmitte hatten wir 1,93A. Nun haben wir angenommen, dass der Strom linear von 1,98 auf 1,93A während unserer Messung abgefallen ist. Deshalb haben wir eine Gerade durch die zwei Punkte (21,9cm / 1,98A) und (-23,1cm / 1,93A) bestimmt und diese Geradengleichung  $I(t)$  in das Biot-Savart-Gesetz eingesetzt.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} (d\vec{l} \times \vec{r}) \quad \Rightarrow \quad B(z) = \frac{NI\mu_0}{2l} \left( \frac{z + \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + (z + \frac{l}{2})^2}} - \frac{z - \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + (z - \frac{l}{2})^2}} \right) \quad (5)$$

Mit  $N=814$ ,  $l= 20,8\text{cm}$ ,  $R = 3,7\text{cm}$  und

$$I(t) = \left(\frac{1}{9}x + 1,956\right)A \quad (6)$$

können wir das Magnetfeld der Spule berechnen.

$$B(z) = \frac{814 \cdot I(t) \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,208} \cdot \left( \frac{z + \frac{0,208}{2}}{\sqrt{0,037^2 + (z + \frac{l}{0,208})^2}} - \frac{z - \frac{0,208}{2}}{\sqrt{0,037^2 + (z - \frac{l}{0,208})^2}} \right) T \quad (7)$$

Die berechneten Werte befinden sich im Anhang.

In folgendem Schaubild haben wir nun unsere Messpunkte (schwarz) und die theoretisch berechnete Funktion (rot) dargestellt.

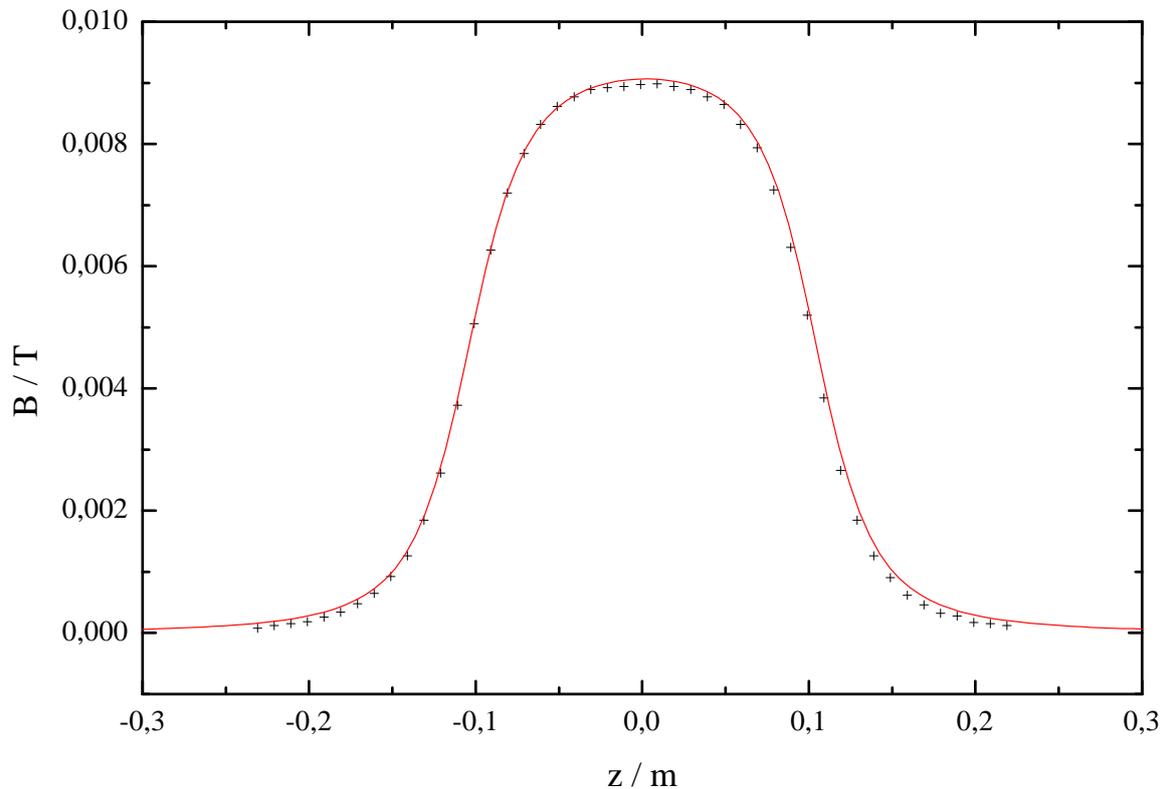


Abbildung 10: Magnetfeld einer langen Spule

Man sieht, dass unsere Messwerte sehr gut mit den theoretisch berechneten Werten übereinstimmen und es so gut wie keine Abweichungen gibt.

## 4 Inhomogenes Magnetfeld

In diesem Teil haben wir die Wirkung eines inhomogenen Feldes auf dia-,para- und ferromagnetische Körper getestet. Dazu haben wir auf den U-Kern zwei spitze Polschuhe montiert, die ein inhomogenes Feld erzeugen. Das Feld ist direkt zwischen den beiden Spitzen am stärksten.

Nun haben wir die drei Stoffe in Form dünner Stäbchen zwischen die Polschuhe gebracht und dann das Magnetfeld eingeschaltet (über die zwei Spulen).

Als wir das Aluminium Stäbchen (Paramagnet) zwischen die Polschuhe gebracht haben, wäre zu erwarten gewesen, dass sich das Stäbchen parallel zu den Spitzen dreht. Dieser Effekt war zu erkennen aber leider nur sehr schwach.

Beim Eisen (Ferromagnet) war dieser Effekt sehr schön zu sehen. Das Stäbchen hat sich, auch schon bei geringem Strom, parallel zu den Spitzen gedreht. Hier hat man auch gesehen, wie man zwischen einem para- und einem ferromagnetischem Stoff unterscheiden kann. Ein Ferro-

magnet richtet sich auch schon bei geringerem Magnetfeld (also Stromstärke) aus, wobei eine paramagnetischer Stoff ein stärkeres Magnetfeld benötigt.

Als wir das Bismut (diamagnetisch) zwischen die Polschuhe gebracht hatten, hat sich das Stäbchen wie erwartet senkrecht zu den Spitzen ausgerichtet.

## 5 Anhang

### 5.1 Anhang: Tabelle zu Aufgabe 2.1

I / A	B / T	B <sub>korrigiert</sub> / T	H / Am <sup>-1</sup>	H <sub>Scher</sub> / Am <sup>-1</sup>
0,0	0,006	0	0,00	0,00
5,3	0,011	0,005	22,08	5,48
9,8	0,015	0,009	40,83	10,95
15,0	0,02	0,014	62,50	16,01
20,2	0,025	0,019	84,17	21,08
25,2	0,03	0,024	105,00	25,32
30,3	0,036	0,03	126,25	26,67
35,3	0,041	0,035	147,08	30,90
40,0	0,046	0,04	166,67	33,90
35,2	0,042	0,036	146,67	27,19
29,9	0,036	0,03	124,58	25,01
25,0	0,032	0,026	104,17	17,88
20,0	0,027	0,021	83,33	13,65
15,0	0,022	0,016	62,50	9,41
8,8	0,017	0,011	36,67	0,19
4,4	0,012	0,006	18,33	-1,55
0,0	0,008	0,002	0,00	-6,60
-5,0	0,002	-0,004	-20,83	-7,54
-10,1	-0,003	-0,009	-42,08	-12,19
-15,0	-0,008	-0,014	-62,50	-16,01
-20,3	-0,014	-0,02	-84,58	-18,19
-25,5	-0,02	-0,026	-106,25	-19,96
-30,4	-0,029	-0,035	-126,67	-10,57
-35,4	-0,032	-0,038	-147,50	-21,41
-40,3	-0,038	-0,044	-167,92	-21,93
-35,2	-0,033	-0,039	-146,67	-17,28
-30,1	-0,028	-0,034	-125,42	-12,63
-25,0	-0,023	-0,029	-104,17	-7,98
-19,7	-0,018	-0,024	-82,08	-2,50
-14,6	-0,013	-0,019	-60,83	2,16
-10,1	-0,009	-0,015	-42,08	7,62
-5,1	-0,004	-0,01	-21,25	11,86
0,0	0	-0,006	0,00	19,81
5,5	0,006	0	22,92	22,82
9,7	0,011	0,005	40,42	23,74
15,2	0,017	0,011	63,33	26,75
20,2	0,022	0,016	84,17	30,99
24,9	0,028	0,022	103,75	30,68
30,1	0,033	0,027	125,42	35,74
35,3	0,04	0,034	147,08	34,21
40,1	0,045	0,039	167,08	37,61

## 5.2 Anhang: Tabelle zu Aufgabe 2.2

I / A	B / T	B <sub>korrigiert</sub> / T	H / Am <sup>-1</sup>	H <sub>Scher</sub> / Am <sup>-1</sup>
0,00	0,005	0	0,00	0,00
-0,11	-0,125	-0,13	-475,00	-43,77
-0,20	-0,222	-0,227	-833,33	-80,33
-0,31	-0,357	-0,362	-1304,17	-103,44
-0,40	-0,456	-0,461	-1650,00	-120,95
-0,50	-0,563	-0,568	-2091,67	-207,47
-0,59	-0,652	-0,657	-2458,33	-278,74
-0,71	-0,742	-0,747	-2958,33	-479,49
-0,82	-0,81	-0,815	-3416,67	-711,38
-0,90	-0,852	-0,857	-3750,00	-904,65
-1,01	-0,891	-0,896	-4208,33	-1232,31
-1,11	-0,919	-0,924	-4625,00	-1554,79
-1,20	-0,944	-0,949	-5000,00	-1845,68
-1,10	-0,923	-0,928	-4583,33	-1500,09
-1,02	-0,901	-0,906	-4250,00	-1240,78
-0,91	-0,866	-0,871	-3791,67	-899,92
-0,81	-0,825	-0,83	-3375,00	-620,36
-0,70	-0,767	-0,772	-2916,67	-355,44
-0,60	-0,694	-0,699	-2500,00	-181,55
-0,50	-0,598	-0,603	-2083,33	-83,60
-0,40	-0,499	-0,504	-1666,67	4,44
-0,30	-0,377	-0,382	-1250,00	16,54
-0,20	-0,265	-0,27	-833,33	61,66
-0,10	-0,139	-0,144	-416,67	60,55
0,00	-0,019	-0,024	0,00	79,25
0,10	0,109	0,104	416,67	71,53
0,20	0,226	0,221	833,33	100,14
0,30	0,348	0,343	1250,00	112,24
0,40	0,457	0,452	1666,67	167,26
0,50	0,568	0,563	2083,33	215,68
0,61	0,666	0,661	2541,67	348,52
0,71	0,741	0,736	2958,33	515,81
0,82	0,813	0,808	3416,67	734,50
0,90	0,851	0,846	3750,00	940,97
1,00	0,888	0,883	4166,67	1233,74
1,12	0,923	0,918	4666,67	1616,09
1,20	0,944	0,939	5000,00	1878,70
1,10	0,923	0,918	4583,33	1533,11
1,00	0,889	0,884	4166,67	1230,44
0,91	0,865	0,86	3791,67	936,24
0,81	0,824	0,819	3375,00	656,68
0,70	0,767	0,762	2916,67	388,46

0,61	0,698	0,693	2541,67	242,86
0,50	0,596	0,591	2083,33	123,22
0,38	0,471	0,466	1583,33	38,05
0,29	0,373	0,368	1208,33	-11,81
0,21	0,268	0,263	875,00	2,95
0,09	0,123	0,118	375,00	-16,19
0,00	0,019	0,014	0,00	-46,23
-0,10	-0,102	-0,107	-416,67	-61,63
-0,20	-0,221	-0,226	-833,33	-83,63
-0,31	-0,35	-0,355	-1291,67	-114,11
-0,40	-0,462	-0,467	-1666,67	-117,73
-0,50	-0,558	-0,563	-2083,33	-215,68
-0,60	-0,658	-0,663	-2500,00	-300,42
-0,71	-0,745	-0,75	-2958,33	-469,58
-0,81	-0,805	-0,81	-3375,00	-686,40
-0,90	-0,847	-0,852	-3750,00	-921,16
-1,02	-0,891	-0,896	-4250,00	-1273,80
-1,11	-0,919	-0,924	-4625,00	-1554,79
-1,19	-0,94	-0,945	-4958,33	-1817,40

## 5.3 Anhang: Tabelle zu Aufgabe 3.2

x / cm	U / mV	z / m	B / T
85	0,008	0,219	1,23E-04
84	0,01	0,209	1,54E-04
83	0,011	0,199	1,69E-04
82	0,018	0,189	2,77E-04
81	0,021	0,179	3,23E-04
80	0,03	0,169	4,62E-04
79	0,04	0,159	6,15E-04
78	0,059	0,149	9,08E-04
77	0,082	0,139	1,26E-03
76	0,12	0,129	1,85E-03
75	0,173	0,119	2,66E-03
74	0,25	0,109	3,85E-03
73	0,338	0,099	5,20E-03
72	0,41	0,089	6,31E-03
71	0,471	0,079	7,25E-03
70	0,516	0,069	7,94E-03
69	0,541	0,059	8,32E-03
68	0,562	0,049	8,65E-03
67	0,57	0,039	8,77E-03
66	0,578	0,029	8,89E-03
65	0,581	0,019	8,94E-03
64	0,584	0,009	8,98E-03
63	0,583	-0,001	8,97E-03
62	0,581	-0,011	8,94E-03
61	0,58	-0,021	8,92E-03
60	0,578	-0,031	8,89E-03
59	0,57	-0,041	8,77E-03
58	0,56	-0,051	8,62E-03
57	0,541	-0,061	8,32E-03
56	0,51	-0,071	7,85E-03
55	0,468	-0,081	7,20E-03
54	0,407	-0,091	6,26E-03
53	0,329	-0,101	5,06E-03
52	0,242	-0,111	3,72E-03
51	0,17	-0,121	2,62E-03
50	0,12	-0,131	1,85E-03
49	0,082	-0,141	1,26E-03
48	0,06	-0,151	9,23E-04
47	0,042	-0,161	6,46E-04
46	0,031	-0,171	4,77E-04
45	0,022	-0,181	3,38E-04
44	0,017	-0,191	2,62E-04
43	0,012	-0,201	1,85E-04
42	0,01	-0,211	1,54E-04
41	0,008	-0,221	1,23E-04
40	0,005	-0,231	7,69E-05