



SS/WS 20.10./11.

Praktikum: (P1/P2) (~~Mo~~/~~Di~~/~~Mi~~/~~Do~~) Gruppe-Nr: 00-27

Name: ~~Miet~~ Wolfstädter Vorname: Michael

Name: Rommel Vorname: Manuel

Versuch: Magnetfeldmessungen (mit/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Ruben Hüning Durchgeführt am: 02.12.2010

Abgabe am: 09.12.2010

Rückgabe am:

Begründung:

2. Abgabe am:

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum: 16. DEZ. 2010

Handzeichen: R. H.

Bemerkungen:



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 600Ω -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 +40mA, dann zurück bis Null, weiter bis -40mA, wieder bis Null und schließlich wieder bis +40mA.

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 600Ω -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° gegen die Verbindungslinie zwischen den Polspitzen gedreht ein. Beobachten und erklären Sie die Effekte beim Einschalten des Feldes (2×1000 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.

P1: Magnetfeldmessungen Vorbereitung

Michael Wolfstädter
Gruppe Do-27

2. Dezember 2010

1 Allgemeines

Hysteresis:

Hysteresis bezeichnet das Phänomen, dass die Magnetisierung eines Materials nicht nur vom ihm umgebenden H-Feld abhängt, sondern auch von der Vorgeschichte des Materials. Wenn das H-Feld außenherum also abgestellt wird, ist das Material trotzdem noch magnetisiert. Denn im Eisenkern befinden sich Weißsche Bezirke. Sind diese zu großen Teilen gleich orientiert, so entsteht ein äußeres Magnetfeld. Durch ein H-Feld drumherum kann man sie ausrichten. Durch Anlegen eines Wechselstroms in der umgebenden Spule (also ein wechselndes H-Feld) kann man die Weißschen Bezirke in Unordnung bringen und so das Material entmagnetisieren. 

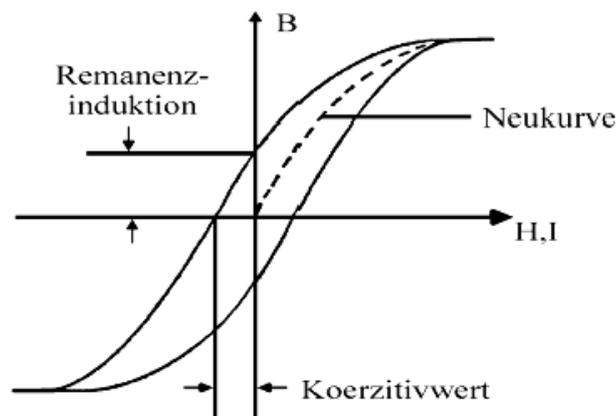


Abbildung 1: Hysteresis-Kurve

Hall-Sonde:

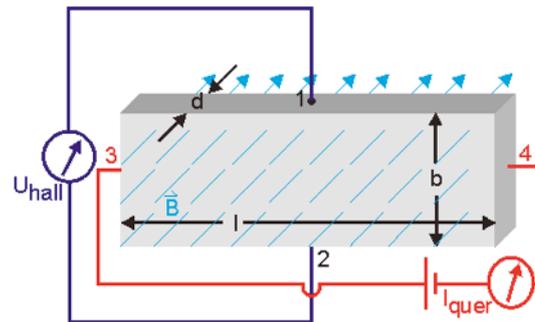


Abbildung 2: Aufbau einer Hall-Sonde

Die Hallspannung kann mit Hilfe einer Hall-Sonde gemessen werden und wird in diesen Versuchen benutzt um die Stärke des Magnetfeldes über eine induzierte Spannung zu bestimmen. Das Prinzip basiert darauf, dass bewegte Ladungen im Magnetfeld eine Kraft erfahren, die Lorentz-Kraft. Durch die Hall-Sonde fließen Elektronen von Punkt 4 nach 3. Das Magnetfeld lenkt sie nach oben ab. Da unten dann Elektronenmangel herrscht und oben Elektronenüberschuss, besteht eine Spannung zwischen Punkt 1 und 2.

Die Lorentzkraft berechnet sich folgendermaßen:

$$F_L = q(v \times B)$$

Die Hallspannung berechnet sich nun folgendermaßen:

$$\begin{aligned} F_L &= eE \\ e(v \times B) &= eU_H/b \\ \Rightarrow U_H &= Bv_s b \end{aligned}$$

Aus $I = nev/s$ folgt mit der Elektronendicht $n = N/V$ und $V = As$:
 $I = NeAv \Rightarrow v = I/(neA)$. Setzt man nun v in $U_H = Bv_s b$ ein, so folgt: $U_H = BHI/(neA)$. Wegen $A = db$ erhält man $U_H = (1/ne) * (BI/d)$

2 Aufgabe 1

2.1 Aufgabe 1.1 Entmagnetisieren des Kerns

Hier soll man den Spulenkern so gut wie möglich entmagnetisieren. Dies ist dann v.a. auch wichtig vor Aufgabe 2 damit man dort gute Messergebnisse erhält. Dies funktioniert, indem man zuerst den maximal möglichen Wechselstrom fließen lässt (ca. 0,75V)

und diesen dann langsam auf Null runter regelt um eben die Weißschen Bezirke langsam umzusortieren.

Zum Überprüfen der Entmagnetisierung, könnte man Eisenfeilspäne oder kleine Magnete (z.B. Kompassnadeln) um den Kern herum verteilen. Richten sie sich aus, so ist noch eine Magnetisierung vorhanden. Man könnte aber auch einfach mit einer Hallsonde im Raum drumherum das Magnetfeld messen.

2.2 Aufgabe 1.2 Messen des induktiven Widerstands ohne Luftspalt

Hier soll der induktive Widerstand zweier sinnvoll in Reihe geschalteter Spulen mit einem gemeinsamen Eisenkern in Abhängigkeit vom Spulenstrom gemessen werden. Der induktive Widerstand berechnet sich folgendermaßen:

$$\begin{aligned}
 U &= -L\dot{I} && \text{mit } U = U_0 \cos(\omega t) \\
 I(t) &= -\frac{U_0}{L} \int \cos(\omega t) dt \\
 I(t) &= \frac{U_0}{L \cdot \omega} \sin(\omega t) && \text{mit } I = I_0 \sin(\omega t) \\
 \Rightarrow R_L &= \frac{U_0}{I_0} = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \omega L
 \end{aligned}$$

Hierzu muss der ohmsche Widerstand vernachlässigt werden, denn sonst hat man stattdessen den Scheinwiderstand R_S gemessen:

$$R_S = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \sqrt{R_\Omega^2 + R_L^2}$$

Man soll nun noch beim größten Messstrom die Induktivität und daraus Permeabilität des Kerns berechnen.

Die Berechnung geht hier folgendermaßen:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot n^2 \cdot A}{l} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$$

μ_r ergibt sich dann zu:

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

2.3 Aufgabe 1.3 Messen des induktiven Widerstands mit Luftspalt

Hier soll man wieder dasselbe wie in Aufgabe 1.2 machen, diesmal jedoch mit einem Spalt von $l_s \approx 2mm$ Breite.

Man soll nun wieder beim größten Messstrom die Induktivität und daraus Permeabilität des Kerns berechnen. Es ergibt sich jedoch diesmal nur ein „scheinbarer“ Wert der Permeabilität.

Es gilt für H und B:

$$H = \frac{n}{l}I \text{ und } B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n}{l}I$$

Die Normalkomponente von B ist stetig an der Grenzfläche zu anderen Medien. Daher gilt für die Normalkomponenten (mit Index L für Luft und K für Kern):

$$B_L = B_K \Rightarrow \mu_L \cdot H_L = \mu_K \cdot H_K$$

mit $\mu_L \approx 1$:

$$H_L = \mu_K \cdot H_K$$

Das gesamte H ergibt sich also zu:

$$H = \frac{n}{l}I = \oint H ds = (l - l_s)H_K + l_s H_L$$

Umformen ergibt:

$$H_L = \frac{n}{l}I \cdot \mu_K \cdot \frac{1}{(l - l_s) + l_s \mu_K}$$

Mit $H_L = \mu_K \cdot H_K$ und $B_L = B_K = \mu_K \cdot H_K$ ergibt sich:

$$B_L = \mu_0 \cdot \mu_K \cdot \frac{n}{l}I \cdot \frac{1}{(l - l_s) + l_s \mu_K} = \mu_0 \cdot \mu_K \cdot H \cdot \frac{1}{(l - l_s) + l_s \mu_K}$$

wobei hier dann gilt: $\mu_{Schein} = \mu_K \cdot \frac{1}{(l - l_s) + l_s \mu_K}$. Mit diesem Wert als μ_r kann dann die scheinbare Induktivität nach der normalen Formel wie oben berechnet werden. Die Induktivität mit Luftspalt ist kleiner als die ohne. Und somit ist auch der induktive Widerstand mit Luftspalt kleiner als der Widerstand ohne.

3 Aufgabe 2 Messen von Hysteresisschleifen

3.1 Aufgabe 2.1 Messung bei geringem Spulenstrom

Hier soll die B(H)-Kurve aufgenommen werden. Wichtig ist hier, dass man einen 600Ω Widerstand in Reihe zur Spule schaltet. Der Strom durch die Spule soll dann von 0mA auf 40mA gesteigert werden und mehrmals zwischen drin gemessen werden, dann soll man auf -40mA runtergehen und dann nochmal auf 40mA hoch.

Da ein Luftspalt im Eisenkern ist, gilt:

$$H_s \cdot l_s + H \cdot l = n \cdot I$$

mit $H_s = \frac{B}{\mu_0}$ im Spalt, $H = H$ im Eisen, l =Feldlinienlänge im Eisen, l_s =Feldlinienlänge im Spalt.

Auflösen nach H ergibt:

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

Man muss also aufgrund des Luftspaltes eine Korrektur durchführen.

Aus der mittleren Steigung der nicht korrekten Schleife wird nun die scheinbare Permeabilität berechnet und mit dem Ergebnis vom 1.3 verglichen. Dann kann man noch aus der korrigierten Schleife die relative Permeabilität von Eisen berechnen und mit dem Ergebnis von 1.2 vergleichen.

Für die Verlustleistung gilt: $P = V A f$, wobei V das Volumen des Eisenkerns bezeichnet, A die Fläche der Hysterese-Kurve und f die Frequenz.

3.2 Aufgabe 2.2 Messung bei hohem Spulenstrom

Diesmal soll der vorgeschaltete Widerstand weggelassen werden und der maximale Strom auf 1,2A gesteigert werden. Hier sollen auch die Remanenz, die Koerzitivkraft und die Sättigungsmagnetisierung bestimmt werden.

Remanenz bezeichnet die Restmagnetisierung, die übrig bleibt, wenn kein äußeres Feld mehr anliegt.

Die Koerzitivkraft gibt an welches H-Feld anliegen muss um das Material zu entmagnetisieren.

4 Aufgabe 3

4.1 Aufgabe 3.1 Eichen einer Longitudinalfeld-Hallsonde

Wie man im allgemeinen Teil am Anfang meiner Vorbereitung sehen kann, ist B proportional zu U_H . Die Proportionalitätskonstante sollen wir durch Bestimmung von $U_H - B$ Wertepaaren bestimmen. Wir wissen, dass das Magnetfeld der Spule im Zentrum ein Minimum aufweist, bei dem die Feldstärke 10mT beträgt, wenn der Spulenstrom 0,96A fließt.

4.2 Aufgabe 3.2 Messen des Magnetfelds entlang der Zylinderachse

Es gilt das Biot-Savart-Gesetz:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} d\vec{l} \times \vec{r}$$

Daraus kann man folgende Formel für das Magnetfeld im Innern der Spule berechnen:

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

5 Dia-/Para-/Ferromagnetismus

Hier soll man die verschiedenen magnetischen Phänomene beobachten.

Diamagnetismus: Diamagnetische Stoffe haben eine Suszeptibilität kleiner null, das bedeutet, das Magnetfeld im Material ist dem äußeren Material entgegengesetzt gerichtet. Auf atomarer Ebene kann man es sich so vorstellen, dass die Moleküle kein permanentes Dipolmoment besitzen. In einem inhomogenen Feld werden solche Stoffe daher in Bereiche geringerer Feldstärke gezogen.

Paramagnetismus: Paramagnetische Stoffe haben eine Suszeptibilität größer null, dies bedeutet die Moleküle besitzen ein permanentes Dipolmoment, die sich an einem äußeren Magnetfeld ausrichten, sofern eines außen anliegt. In einem inhomogenen Feld werden solche Stoffe daher in Bereiche höherer Feldstärke gezogen.

Ferromagnetismus: Ferromagnetische Stoffe haben eine Suszeptibilität $\gg 0$. Ferromagnetische Stoffe sind ähnlich paramagnetischen, behalten jedoch ihre Magnetisierung bei auch wenn das äußere Feld abgeschaltet wird. In einem inhomogenen Feld werden solche Stoffe daher in Bereiche höherer Feldstärke gezogen.

P1: Magnetfeldmessungen

Manuel Rommel

Do-27

2. Dezember 2010

Allgemeines

Hall-Effekt

Magnetfelder können auf verschiedene Art und Weisen gemessen werden. Eine beliebte Methode ist die Hall-Sonde, da mit ihr die Stärke des Magnetfeldes prinzipiell an beliebigen Orten im Raum gemessen werden kann und die Halbleitersonde relativ einfach hergestellt werden kann. Deswegen folgt eine kurze Beschreibung des Hall-Effekts.

Auf jedes geladene Teilchen, das sich in einem Magnetfeld bewegt, wirkt die Lorentzkraft $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$. Wird ein Leiter so in ein Magnetfeld gehalten, dass das Magnetfeld senkrecht auf der Stromrichtung steht, wirkt die Lorentzkraft auf die Ladungsträger und bewirkt eine Ladungsverschiebung. Nach kurzer Zeit hat sich ein Gleichgewicht aus der Lorentzkraft und der abstoßenden Kraft zwischen den Ladungsträgern eingestellt. Diese Ladungstrennung kann man am Leiter als Hall-Spannung messen. Sind elektrische und Lorentzkraft gleich groß, gilt:

$$F_L = F_{El} \quad \Leftrightarrow \quad qv_D B = q \frac{U_H}{d} \quad \Leftrightarrow \quad U_H = dv_D B$$

Diese Gleichung kann man über einige geometrischen Umformungen schreiben als

$$U_H = \frac{1}{nq} \frac{IB}{d} \quad (1)$$

mit der Ladungsträgerdichte n . Der Term $\frac{1}{nq}$ wird manchmal in der vom Material abhängigen Hall-Konstanten R_H zusammengefasst.

Hysteresisschleife

Generell beschreibt die Hysterese die Abhängigkeit einer variablen Ausgangsgröße von der „Geschichte“ des Vorgangs. Im Falle der magnetischen Hysterese bedeutet das, dass die Magnetisierung des Spulenkerns nicht nur von der magnetischen Erregung H , sondern auch von der vorigen Magnetisierung und dem „Weg“ abhängt, den das H -Feld zum Endwert vollzogen hat.

Legt man einen unmagnetisierten (Eisen-) Kern in eine Spule und steigert den Spulenstrom von $0A$, magnetisiert sich der Kern. Bei einem genügend hohen Strom führt eine weitere

1.2 Induktiver Widerstand zweier Spulen mit Eisenkern

Nun soll der induktive Widerstand R_L zweier Spulen mit gemeinsamem Eisenkern bestimmt werden. Dazu schließt man die Spulen in Reihe. Um die Messung der Spannung, die an den Spulen anliegt, wie gefordert spannungsrichtig durchzuführen, muss das Spannungsmessgerät direkt an den Spulen angeschlossen werden. Den induktiven Widerstand berechnet man mit

$$R_L = \frac{U_{eff}}{I_{eff}}$$

Zusätzlich soll beim größten Messstrom die Induktivität L bestimmt werden über

$$R_L = \omega L = 2\pi f L \quad \Leftrightarrow \quad L = \frac{R_L}{2\pi f}$$

Mit $L = \mu_0 \mu_r n^2 \frac{A}{l}$ ergibt sich für die relative Permeabilität

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

1.3 Messung mit Luftspalt

Die gleichen Messungen sollen noch einmal durchgeführt werden, diesmal allerdings mit einem Luftspalt von $2mm$ im Eisenkern. Die Messergebnisse beider Messreihen sollen in einem $R_L(I)$ -Diagramm dargestellt werden.

2 Messen von Hysteresiskurven

2.1 Messung mit niedrigem Strom

Um die Effekte des Luftspalts näher zu untersuchen, sollen nun Hysteresisschleifen aufgenommen werden. Dazu misst man im Luftspalt mit einer Hallsonde das Magnetfeld und berechnet H über

$$H = \frac{n}{l} \left(I - \frac{l_s}{n} \frac{B}{\mu_0} \right) \quad (2)$$

Diese Scherung ist notwendig, da der Luftspalt zu berücksichtigen ist. Um den Strom durch die Spule besser steuern zu können, soll man einen 600Ω -Widerstand in Reihe zur Spule schalten.

Mit diesen Werten kann man dann $B(H)$ plotten, wenn man wie am Anfang beschrieben die Messung durchführt. Aus dem unkorrigierten $B(H)$ -Diagramm soll man die „scheinbare“ relative Permeabilität über die mittlere Steigung der Kurven und aus dem korrigierten $B(H)$ -Diagramm die relative Permeabilität über die mittlere Steigung dieses Diagramms bestimmen. Die Werte sind mit denen aus Aufgabe 1 zu vergleichen.

Die Verlustleistung lässt sich mit der Fläche in der Hysteresiskurve folgendermaßen berechnen:

$$P = V \cdot A \cdot f$$

2.2 Messen bei höherem Strom

Der Widerstand wird nun entfernt, d.h. der Spulenstrom ist nun deutlich größer. Die Messung wird wie in 2.1 durchgeführt. An dieser Messung sollen außerdem noch Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivfeldstärke entsprechend der Einführung am Anfang bestimmt werden.

3 Feldstärke von Spulen

3.1 Eichung der Hallsonde

Da die Magnetfelder mit einer Hallsonde gemessen werden, muss die Hallsonde geeicht werden. Gleichung (1) kann man zu diesem Zweck umschreiben zu

$$U_H = kB \quad (3)$$

mit $k = \frac{R_H I}{d}$. Um k experimentell zu bestimmen, misst man einige Wertepaare (Hallspannung und Spulenstrom) der Referenzspule und ermittelt k über die Formel

$$k = \frac{U_H}{B} = \frac{U_H}{10mT} \quad (4)$$

Dann kann man mit (3) das Magnetfeld bestimmen.

3.2 Magnetfeld einer Zylinderspule

Hier soll das Magnetfeld im inneren und um die Spule herum gemessen werden und mit folgender Formel verglichen werden:

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

Herleiten lässt sich die Formel mit dem Biot-Savart-Gesetz:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} d\vec{l} \times \vec{r}$$

4 Demonstrationsversuch zum inhomogenen Magnetfeld

In diesem Versuch soll die Auswirkung eines stark inhomogenen Magnetfeldes auf ferro-, para- und diamagnetische Materialien betrachtet werden.

- **Ferromagnetische Stoffe:** Sie haben eine große Suszeptibilität, d.h. ein erregendes Magnetfeld richtet schnell sehr viele Elementarmagneten im Material parallel zum äußeren Feld aus und das Material hat auch ohne Erregung eine Magnetisierung. Die Magnetisierung verstärkt das äußere Feld. Im inhomogenen Feld ist deshalb anzunehmen, dass das Probematerial stark in Richtung höheres Magnetfeld gezogen wird.
- **paramagnetische Stoffe:** Sie haben eine kleine, aber noch positive Suszeptibilität, d.h. ein erregendes Magnetfeld richtet die zunächst ungeordneten Elementarmagneten teilweise aus. Die dadurch entstehende Magnetisierung verstärkt auch hier das erregende Feld, allerdings deutlich schwächer als ein ferromagnetischer Stoff. Das Material wird wieder in Richtung höheres Magnetfeld gezogen, allerdings diesmal schwächer.
- **diamagnetische Stoffe:** Die Suszeptibilität ist negativ, d.h. die Magnetisierung richtet sich gegen das äußere Feld. Deshalb wird der diamagnetische Stoff vom höheren Magnetfeld weggedrängt.

Magnetfeldmessungen

DO-27

1.1) Spule auf Eisenkern aufgebracht und Joel festgeschraubt.

($n=250$, der Abgriff erfolgt aber in der "Mitte").

Der Generator lieferte aber nur max. $0,47\text{ A}$.

Überprüfen der Entmagnetisierung mit einer Hallsonde (die vorher auf 0 gestellt wurde)

1.2)

$U_{\text{in}} \text{ V}$	5,1	10,4	14,9	20,4	25,2	30,6	
$I_{\text{in}} \text{ mA}$	1,3	2,2	2,9	3,7	4,3	4,95	0-200V~ Messbereich: 0-10 mA~

1.3) Messung mit Luftspalt 2mm

$U_{\text{in}} \text{ V}$	4,8	9,9	15,2	20,0	25,0	30,2	0-200V~
$I_{\text{in}} \text{ mA}$	4,2	8,0	11	14,25	17,5	20,75	
	0-10 mA		0-30 mA				

2.1) Kern entmagnetisieren wie in 1.1 ($0,5\text{ mT}$ Restmagnetisierung)

Widerstände $1,2\text{ k}\Omega$ und $1\text{ k}\Omega$ parallel geschaltet in den Stromkreis eingeschalt.

Neubereich:

$I_{\text{in}} \text{ mA}$	0	5	10,5	15	20	25	30	35	40
$B_{\text{in}} \text{ mT}$	0,52	5,1	10,7	14,9	20,0	26,0	37,1	36,7	42,6

35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
38,2	33,5	28,4	23,6	18,5	13,4	8,6	3,6	-2,7	-8,3	-13,6	-19,3	-25,2	-30,5	-36,8	-42,2

(-3)

-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
-37,6	-32,5	-27,9	-23,0	-18,1	-12,4	-8,2	-3,0	3,2	8,5	14,6	20,0	25,5	31,3	37,0	42,6

2.2) Es wurde keine Entmagnetisierung durchgeführt, da die Stromstärken ohne Widerstand um ein Vielfaches höher sind.

Ablesewerte:

I in A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
B in T	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58

1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
0,92	0,89	0,86	0,82	0,75	0,67	0,58	0,48	0,37	0,25	0,13	0,02

-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2
-0,1	-0,21	-0,33	-0,43	-0,56	-0,65	-0,74	-0,8	-0,85	-0,88	-0,92	-0,94

-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	
-0,92	-0,89	-0,86	-0,82	-0,76	-0,68	-0,6	-0,53	-0,45	-0,36	-0,26	-0,14	-0,02

0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,09	0,22	0,34	0,45	0,55	0,65	0,73	0,80	0,85	0,89	0,92	0,94

3.1) Strom durch die Halbbonde: 112,5 mA

$\Rightarrow k = \frac{U_H}{112,5} \cdot 120$ $U_H = 0,73 \text{ mV (bei } U = 0,90 \text{ V)}$

32

X in cm	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74			
U_H in mV	0,05	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,065	0,09	0,13	0,17	0,26	0,34	0,415			
73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57
U_H in mV	0,47	0,515	0,54	0,56	0,57	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,565	0,55	0,53	0,50	0,46
56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43			
U_H in mV	0,40	0,33	0,245	0,175	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,025	0,02	0,02	0,01		

Position der Spulenaufhängung: 23,1

Länge Aufhängepp. - Aufhängepp. 23,1 cm

Strom am Anfang: 2,04 A

7,0 cm 30,1 cm

am Ende: 7,85 A

4) Die Materialien haben sich wie erwartet verhalten, die Effekte waren teilweise getriggert.

P1: Magnetfeldmessungen

Manuel Rommel
Michael Wolfstädter
Do-27

9. Dezember 2010

1 Induktivität und Erregung

1.1 Entmagnetisierung des Kerns

Für die späteren Versuche wird es wichtig sein, einen entmagnetisierten Kern zu haben. Dazu haben wir auf den offenen U-Kern eine Spule mit 250 Windungen aufgesetzt und die U-Form durch einen aufgedrückten Steg geschlossen. Da die Entmagnetisierung mit einer Spule mit 125 Windungen durchgeführt werden soll, haben wir die Spule über einen Mittelabgriff angeschlossen. Über eine Spannungsquelle haben wir durch die Spule einen Wechselstrom geleitet, wobei die Stromstärke zu Beginn am höchsten (0,47A) war. Eigentlich war eine höhere Stromstärke gefordert, allerdings konnte die Spannungsquelle keinen höheren Strom liefern. Dann haben wir die Spannung langsam gesenkt und so den Kern entmagnetisiert.

Um den Erfolg der Entmagnetisierung zu überprüfen, haben wir in einen der „Arme“ des U-Rohrs mit einem Abstandsplättchen einen Luftspalt gebracht und in diesem Spalt mit einer Hallsonde eine Restfeldstärke von 0,56mT gemessen (der Nullpunkt der Hallsonde wurde vorher korrekt gesetzt).

1.2 Induktivität zweier Spulen mit gemeinsamem Eisenkern

Um die Induktivität zweier Spulen mit gemeinsamem geschlossenen Eisenkern zu bestimmen, haben wir auf beide Arme des U-Kerns je eine Spule mit 1000 Windungen aufgesteckt und den Kern wieder mit einem aufgedrückten Joch geschlossen. Die Spulen wurden dabei so in Reihe geschaltet, dass sich die Magnetfelder im Eisenkern addieren, d.h. das Feld der einen Spule zeigte nach oben, das andere nach unten.

Gemessen haben wir die Spannung an den Spulen sowie den Strom durch die Spulen, wobei wir spannungsrichtig gemessen haben, d.h. wir haben die Spannung direkt an den Spulen abgegriffen und den Strom durch die Spulen und das Spannungsmessgerät gemessen.

Dabei ist auffällig, dass sich nicht wie erwartet ein konstanter Wert für den induktiven Widerstand R_L ergibt. Wir vermuten, dass dies mit der unterschiedlichen Magnetisierung zusammenhängt. Bei einem höheren Strom steigt der induktive Widerstand, da dann die (träge) Magnetisierung des Kerns stärker wird. Ist im Eisenkern ein Luftspalt, ist die Magnetisierung des Eisenkerns deutlich schwächer, wodurch auch bei einem steigenden Strom der induktive Widerstand nur wenig ansteigt.

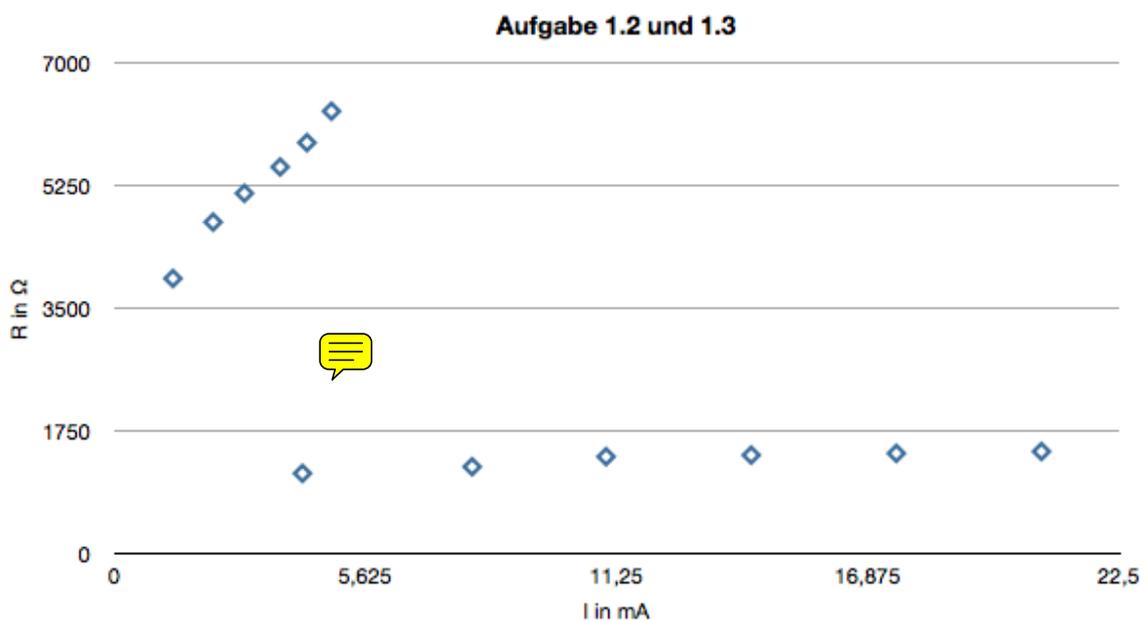
Aufgabe 1.2						
U in V	5,1	10,4	14,9	20,4	25,2	30,6
I in mA	1,3	2,2	2,9	3,7	4,3	4,85
R _L in Ω	3923,1	4727,3	5137,9	5513,5	5860,5	6309
L in H						20,084
μ _r						1229,4

Mit den in der Vorbereitung angegebenen Formeln für L und μ_r und den Werten beim größten Spulenstrom ergibt sich eine Induktivität von ca. $L = 20\text{H}$ und eine relative Permeabilität von ca. 1229. Als Frequenz haben wir dabei die Netzfrequenz $f = 50\text{Hz}$ gewählt.

1.3 Messung mit Luftspalt

Die Messung wurde wie oben wiederholt, allerdings haben wir durch ein massives Plättchen auf dem einen Arm und ein Plättchen mit Aussparung auf dem anderen Arm einen Luftspalt (2mm) eingebracht. Analog zu 1.2 haben wir L zu 4,63H und damit die „scheinbare“ Permeabilität μ_r zu 284 berechnet.

Aufgabe 1.3						
U in V	4,8	9,9	15,2	20,0	25,0	30,2
I in mA	4,2	8,0	11	14,25	17,5	20,75
R _L in Ω	1142,9	1237,5	1381,8	1403,5	1428,6	1455
L in H						4,633
μ _r						283,6



2 Hysteresiskurven

2.1 Messung mit geringem Strom

Um die Hysteresiskurve zu bestimmen, haben wir zunächst den Eisenkern wie in 1.1 entmagnetisiert, da wir nur auf diese Weise auch die Neukurve messen können. Die Restmagnetisierung danach betrug 0,5mT. Um den Spulenstrom genauer einstellen zu können, sollten wir einen 600Ω-Widerstand in Reihe zur Spule anschließen, allerdings hatten wir nur einen 1,2kΩ- und einen 1kΩ-Widerstand zur Verfügung, die wir parallel geschaltet in Reihe an die Spule angeschlossen haben.

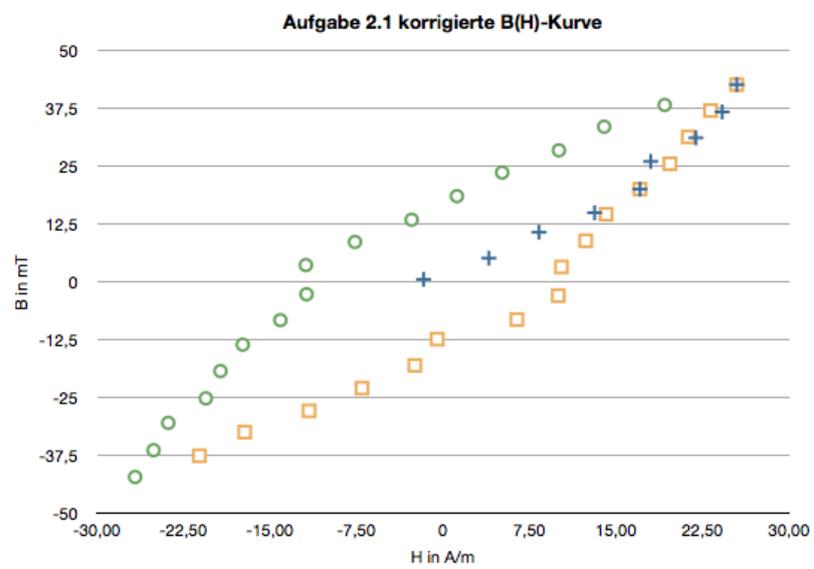
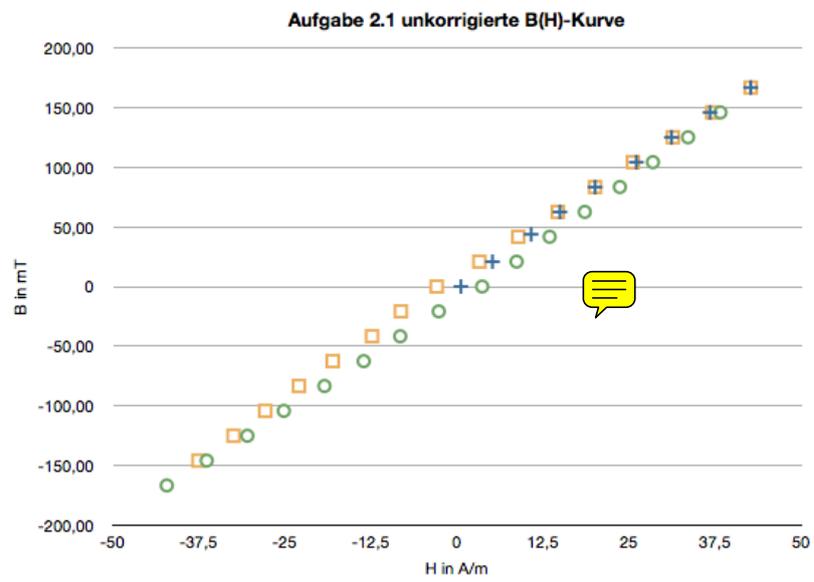
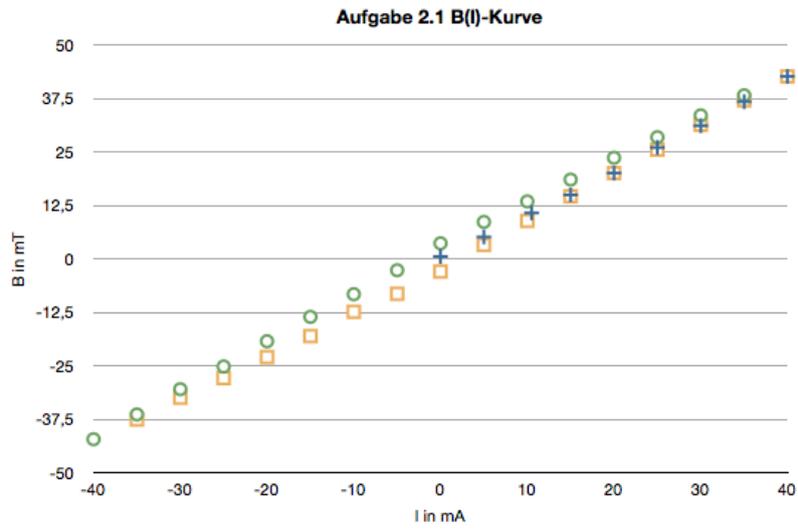
Dann haben wir das Magnetfeld B mit der Hallsonde im Luftspalt in Abhängigkeit vom Spulenstrom gemessen. Dabei haben wir den Strom in Schritten von 5mA ohne zwischenzeitliche Überhöhungen auf 40mA gesteigert, womit wir die Neukurve gemessen haben. Dann haben wir den Strom wieder in gleichen Schritten auf -40mA gesenkt und anschließend wieder auf 40mA gesteigert.

Einerseits haben wir ein B(H)-Diagramm mit einem berechneten $H = \frac{n}{l}I$ aufgetragen und in einem weiteren Schaubild noch B(H) mit einem durch Scherung korrigierten H aufgetragen. Besonders im korrigierten Diagramm fällt die Messunsicherheit auf, die trotz sorgfältigem Messen zustande kam.

Aus der mittleren Steigung der Hysteresiskurve sollten wir die relative Permeabilität bestimmen. Dazu haben wir eine Ausgleichsgerade durch das Diagramm gelegt. Die Steigung haben wir durch μ_0 dividiert. Wir erhielten aus dem beiden Schaubildern Werte von ca. $\mu_r = 202$ (unkorrigiert) und $\mu_r = 1294$ (korrigiert). Dabei fällt auf, dass der unkorrigierte Wert von dem aus 1.3 um ca. 30 %, der korrigierte Wert von dem aus 1.2 nur um 5% abweicht.

Die Verlustarbeit entspricht der von der Hysteresiskurve eingeschlossenen Fläche. Diese haben wir mit dem Computer mit Hilfe eines Integrals über eine interpolierte Kurve durch die Messpunkte zu etwa 1,1 bestimmt haben. Die Verlustleistung ergibt sich damit zu $P = V Af = 40mW$, wobei wir als Frequenz die Netzfrequenz 50Hz angenommen haben und V das Volumen des Eisenkerns ist.

Aufgabe 2.1																
I in mA	0	5	10,5	15	20	25	30	35	40	Neukurve						
B in mT	0,52	5,1	10,7	14,9	20,0	26,0	31,1	36,7	42,6							
H in A/m	-1,72	3,92	8,27	13,09	17,02	17,96	21,88	24,14	25,41							
H=nl/l in A/m	0,00	20,83	43,75	62,50	83,33	104,17	125,00	145,83	166,67							
I in mA	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
B in mT	38,2	33,5	28,4	23,6	18,5	13,4	8,6	3,6	-2,7	-8,3	-13,6	-19,3	-25,2	-30,5	-36,4	-42,2
H in A/m	19,17	13,92	10,00	5,08	1,16	-2,77	-7,68	-11,94	-11,88	-14,15	-17,40	-19,34	-20,61	-23,87	-25,14	-26,74
H=nl/l in A/m	145,83	125,00	104,17	83,33	62,50	41,67	20,83	0,00	-20,83	-41,67	-62,50	-83,33	-104,17	-125,00	-145,83	-166,67
I in mA	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
B in mT	-37,6	-32,5	-27,9	-23,0	-18,1	-12,4	-8,2	-3,0	3,2	8,85	14,6	20,0	25,5	31,3	37,0	42,6
H in A/m	-21,16	-17,24	-11,66	-7,07	-2,48	-0,55	6,36	9,95	10,22	12,32	14,09	17,02	19,61	21,21	23,15	25,41
H=nl/l in A/m	-145,83	-125,00	-104,17	-83,33	-62,50	-41,67	-20,83	0,00	20,83	41,67	62,50	83,33	104,17	125,00	145,83	166,67
mittlere Steigung der unkorrigierten B(H)-K					0,0003	202,45										
mittlere Steigung der B(H)-Kurve:					0,0016	1294										



2.2 Messung mit höherem Strom

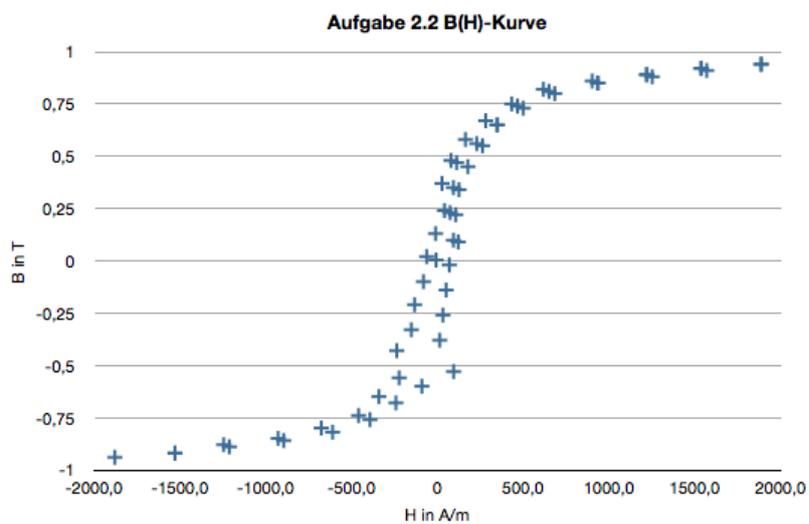
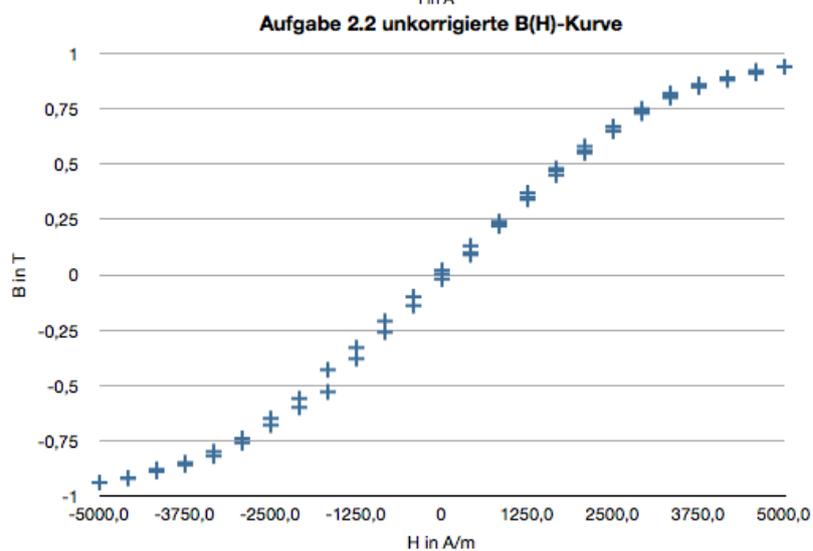
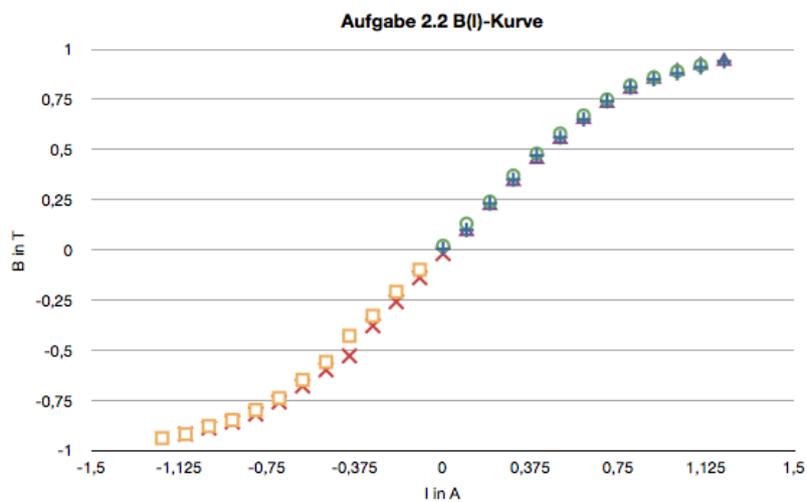
In diesem Versuch haben die Messung von 2.1 mit einem höheren Spulenstrom durchgeführt. Dafür haben wir die Widerstände ausgebaut und somit den Strom auf bis zu 1,2A gesteigert. Wir haben diesmal den Eisenkern vorher nicht entmagnetisiert, da die Remanenz, die nach 2.1 noch bestand, klein war gegen die nun gemessenen Werte für B.

Analog zu 2.1 haben wir die relativen Permeabilitäten bestimmt zu $\mu_r = 150$ (unkorrigiert) und $\mu_r = 397$ (korrigiert). Diese Werte weichen von denen aus 2.1 ab. Wir erklären uns die Abweichung durch den höheren Strom, durch den wir in den Sättigungsbereich der Hysteresiskurve gekommen sind.

Aus dem Diagramm lesen wir ab: Die Remanenz hat einen Wert von ungefähr 0,18T. Die Sättigungsmagnetisierung ist ca. $800 \frac{A}{m}$. Die Koerzitivkraft ist etwa $66 \frac{A}{m}$.

Aufgabe 2.2														
I in A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	Neukurve
B in T	0,0034	0,0986	0,23	0,35	0,47	0,56	0,65	0,74	0,81	0,85	0,88	0,91	0,94	
H in A/m	-11,3	89,7	70,7	89,5	108,2	226,5	344,7	463,0	647,5	931,5	1248,7	1565,9	1883,1	
H=n/l in A/m	0,0	416,7	833,3	1250,0	1666,7	2083,3	2500,0	2916,7	3333,3	3750,0	4166,7	4583,3	5000,0	
I in A	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0		
B in T	0,92	0,89	0,86	0,82	0,75	0,67	0,58	0,48	0,37	0,24	0,13	0,02		
H in A/m	1532,8	1215,6	898,4	614,4	429,8	278,4	160,2	75,1	23,1	37,5	-14,4	-66,3		
H=n/l in A/m	4583,3	4166,7	3750,0	3333,3	2916,7	2500,0	2083,3	1666,7	1250,0	833,3	416,7	0,0		
I in A	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1	-1,1	-1,2		
B in T	-0,1	-0,21	-0,33	-0,43	-0,56	-0,65	-0,74	-0,8	-0,85	-0,88	-0,92	-0,94		
H in A/m	-85,1	-137,0	-155,8	-240,9	-226,5	-344,7	-463,0	-680,7	-931,5	-1248,7	-1532,8	-1883,1		
H=n/l in A/m	-416,7	-833,3	-1250,0	-1666,7	-2083,3	-2500,0	-2916,7	-3333,3	-3750,0	-4166,7	-4583,3	-5000,0		
I in A	-1,1	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0		
B in T	-0,92	-0,89	-0,86	-0,82	-0,76	-0,68	-0,6	-0,53	-0,38	-0,26	-0,14	-0,02		
H in A/m	-1532,8	-1215,6	-898,4	-614,4	-396,6	-245,2	-93,8	90,7	10,0	28,8	47,5	66,3		
H=n/l in A/m	-4583,3	-4166,7	-3750,0	-3333,3	-2916,7	-2500,0	-2083,3	-1666,7	-1250,0	-833,3	-416,7	0,0		
I in A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2		
B in T	0,09	0,22	0,34	0,45	0,55	0,65	0,73	0,8	0,85	0,89	0,92	0,94		
H in A/m	118,2	103,9	122,6	174,5	259,6	344,7	496,1	680,7	931,5	1215,6	1532,8	1883,1		
H=n/l in A/m	416,7	833,3	1250,0	1666,7	2083,3	2500,0	2916,7	3333,3	3750,0	4166,7	4583,3	5000,0		
mittlere Steigung der unkorrigierten B(H)-K				0,0002	149,61									
mittlere Steigung der B(H)-Kurve:				0,0005	397,24									





3 Magnetfeld einer zylindrischen Luftspule

3.1 Eichung der Hallsonde

Um in der nächsten Aufgabe das Magnetfeld bestimmen zu können, haben wir zunächst die Hallsonde geeicht. Dazu stand uns eine Referenzspule zur Verfügung, die durch eine Unterbrechung ungefähr in der Mitte ein Feldstärkeminimum besitzt. Bei einem Strom von 0,96A durch die Spule soll das Minimum eine Feldstärke von 10 mT haben.

Bei der Messung war es leider nicht möglich, den Strom durch die Sonde auf die geforderten 120 mA einzustellen, da nur ein maximaler Strom von 112,5mA möglich war. Außerdem war der Spulenstrom schwer einstellbar, sodass durch die Spule 0,99A flossen. Um die Abweichungen auszugleichen, haben wir die beiden Korrekturterme auf B eingefügt.

$$k = \frac{U_H}{10mT \cdot \frac{112,5}{120} \cdot \frac{0,99}{0,96}}$$

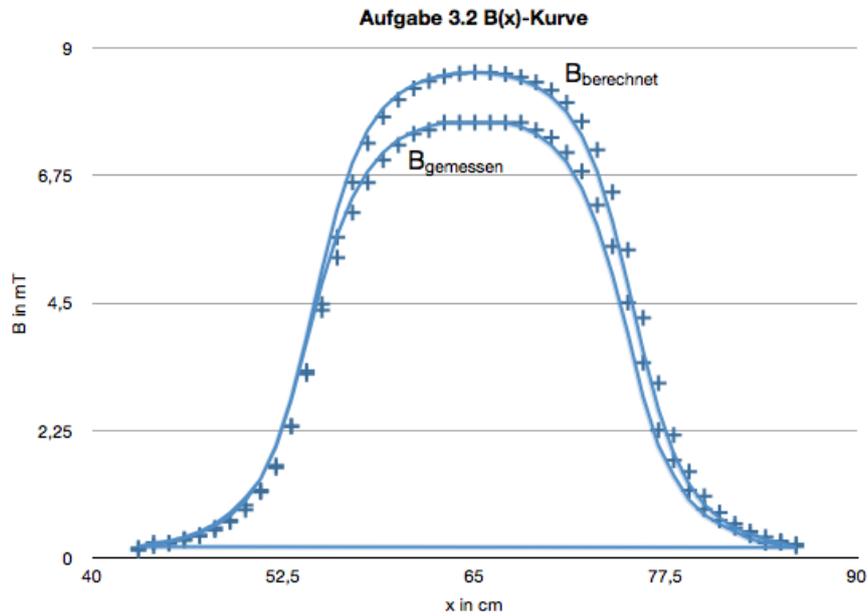
Mit $U_H = 0,73mV$ ergibt sich also $k = 0,0755$.

3.2 Magnetfeld der Spule

Um die Formel für eine zylindrische Spule aus der Vorbereitung zu überprüfen, haben wir mit der geeichten Hallsonde entlang der Zylinderachse innerhalb und außerhalb der Spule das Magnetfeld gemessen. Dabei ist zu beachten, dass wir anfangs den Spulenstrom zwar auf 2A eingestellt haben, der Strom im Laufe der Messungen aber leider auf 1,85A abgefallen ist. Vermutlich hat sich die Spule erwärmt, sodass ihr Widerstand angestiegen ist. Wir vermuten, dass der Abfall des Stroms für die unterschiedlichen Maximalwerte der Magnetfeldstärke verantwortlich ist.

Es ist schön zu sehen, dass die gemessenen Feldstärken bis auf die erwähnten Maximalwerte den Ergebnissen der theoretischen Formel entsprechen. In der Mitte der Spule ist das Magnetfeld annähernd konstant, an den Enden fällt es aber schnell ab. Da das Magnetfeld nur auf wenigen Zentimetern in der Mitte der Spule konstant ist, wäre die Näherung für lange Spulen in diesem Fall also sehr ungenau.

Aufgabe 3.2													
Ort x in cm	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74
U_H in mV	0,015	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,065	0,09	0,13	0,17	0,26	0,34	0,415
B_{gemessen} in mT	0,20	0,26	0,26	0,40	0,53	0,66	0,86	1,19	1,72	2,25	3,44	4,50	5,50
$B_{\text{berechnet}}$ in mT	0,26	0,32	0,40	0,50	0,65	0,86	1,17	1,64	2,34	3,33	4,58	5,87	6,98
Ort x in cm	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61
U_H in mV	0,47	0,515	0,54	0,56	0,57	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57	0,565
B_{gemessen} in mT	6,23	6,82	7,15	7,42	7,55	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,68	7,55	7,48
$B_{\text{berechnet}}$ in mT	7,78	8,33	8,69	8,92	9,07	9,17	9,23	9,26	9,26	9,24	9,19	9,10	8,96
Ort x in cm	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48
U_H in mV	0,55	0,53	0,5	0,46	0,4	0,33	0,245	0,175	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04
B_{gemessen} in mT	7,28	7,02	6,62	6,09	5,30	4,37	3,25	2,32	1,59	1,19	0,93	0,66	0,53
$B_{\text{berechnet}}$ in mT	8,74	8,41	7,91	7,16	6,12	4,84	3,57	2,52	1,76	1,25	0,91	0,69	0,53
Ort x in cm	47	46	45	44	43								
U_H in mV	0,03	0,025	0,02	0,02	0,01								
B_{gemessen} in mT	0,40	0,33	0,26	0,26	0,13								
$B_{\text{berechnet}}$ in mT	0,41	0,33	0,27	0,22	0,19								
Korrekturfaktor wegen Länge des Messensors					0,55								



4 Das Verhalten verschiedener Stoffe im inhomogenen Feld

Um diesen Versuch durchzuführen, haben wir zunächst den Eisenkern entmagnetisiert. Dann haben wir den ferromagnetischen Stab an einem Faden aufgehängt und zwischen den spitzen Enden des Kerns aufgehängt. Der Stab hat wie erwartet stark auf das Magnetfeld reagiert und sich parallel zu den Spitzen ausgerichtet, da in diesem Fall die Feldstärke am größten war. Der paramagnetische Stoff zeigte im inhomogenen Feld keine signifikante Bewegung. Der diamagnetische Stoff hingegen drehte sich wie erwartet senkrecht zu den Spitzen, da dort das Magnetfeld am kleinsten war.