

Protokoll zum
physikalischen Anfängerpraktikum
Ferromagnetische Hysteresekurve von Eisen

Jan Korger (561543), Physik Diplom, 2. Fachsemester
Thomas Lauermann, 547863, Physik-Diplom, 2. Fachsemester

durchgeführt am 19.07.2004

1 Theorie

1.1 Magnetische Felder

Magnetische Felder werden durch die beiden Größen H und B beschrieben. H heißt magnetische Feldstärke und ist dem erzeugenden Strom proportional. B heißt magnetische Flussdichte und ist ein Maß für die Wirkung des magnetischen Feldes auf bewegte Ladungen. Im Vakuum gilt:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1)$$

1.2 Magnetfeld in Materie

In Materie gilt

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2)$$

wobei μ_r eine Materialgröße und nicht zwangsläufig konstant ist. Dies rührt daher, dass durch ein Magnetfeld in Materie elementare magnetische Dipole ausgerichtet werden können, was die Stärke des B-Feldes beeinflusst. Man unterscheidet Dia-, Para- und Ferromagnetismus.

In diamagnetischen Materialien werden Induktionsströme induziert, die gemäß der Lenz'schen Regel dem erzeugenden Magnetfeld ein Gegenfeld entgegensetzen. Das resultierende Magnetfeld ist geringfügig kleiner. Auch bei Paramagneten existiert dieser Effekt, wird jedoch dadurch überkompensiert, dass sich elementare magnetische Dipole so ausrichten, dass sie das Feld verstärken. Bedeutend extremer verstärken Ferromagnete das magnetische Feld. Dieser Effekt wird im folgenden Abschnitt erklärt. Des weiteren gibt es noch Antiferro- und Ferrimagnetismus, worauf wir hier nicht näher eingehen wollen.

1.3 Ferromagnetismus

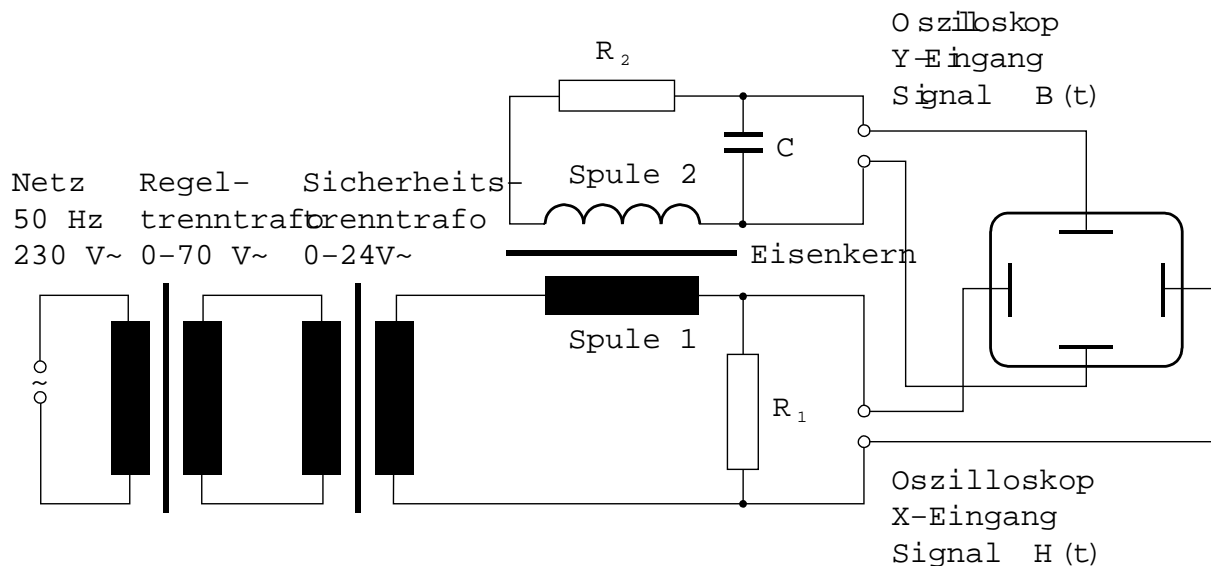
Stoffe wie Nickel, Kobalt und das in diesem Versuch untersuchte Eisen nennt man ferromagnetisch. Dieser Effekt beruht auf der Wechselwirkung der Elektronenspins im Kristallgitter, weshalb er nur in Festkörpern auftritt. In diskreten Bereichen des Festkörpers (sog. Weißsche Bezirke) sind alle magnetischen Momente in eine bestimmte Richtung orientiert, woraus in diesem Bereich ein sehr starkes Magnetfeld resultiert. In unmagnetisierten Ferromagneten mitteln sich die Magnetfelder der einzelnen Weißschen Bezirke zu Null. Legt man aber ein äußeres Feld an, so werden an den Bezirksgrenzen magnetische Momente ausgerichtet, so dass die Grenzen der Weißschen Bezirke (Bloch-Wände) zu Gunsten der in Feldrichtung ausgerichteten Bezirke verschieben. Dies führt zu einer Verstärkung des B-Feldes.

Sind schließlich alle Bereiche zu einem gleich polarisierten vereinigt, spricht man von Sättigung des Ferromagneten. Die B-Feldstärke, bei der vollständige Sättigung auftritt nennt man Sättigungsinduktion B_s . Durch Gitterfehler im Ferromagneten bleibt bei Abschalten des äußeren Feldes ein Rest-B-Feld, die Remanenz, erhalten. Das rührt daher, dass sich nicht alle Weißschen Bezirke wieder umpolarisieren. Erst durch Anlegen eines Feldes in die andere Richtung (Koerzitivkraft) lässt sich das B-Feld wieder neutralisieren. Die hierzu notwendige H-Feldstärke bezeichnet man als Koerzitivfeldstärke H_c .

Die B-Feldstärke in Abhängigkeit der H-Feldstärke bezeichnet man als Hysteresekurve. μ_r kann bei Ferromagneten um die 1000mal so hoch wie bei Paramagneten werden. Dadurch verlaufen bei geschlossenen Ferrokernen fast alle Feldlinien im Kern.

2 Experiment

2.1 Versuchsaufbau



Die Spannung am x-Eingang des Oszilloskops ist proportional dem Strom durch die Spule und damit ein Maß für das H-Feld. Die Spannung, die am y-Eingang anliegt ist ein Maß für das B-Feld, das die Spule 2 durchsetzt. Die Phasenverschiebung wird durch die sogenannte Integratorschaltung, bei der Spannung am Kondensator abgegriffen wird, aufgehoben.

2.2 Messungen

In der Messreihe A bestimmten wir die Hysteresekurve für verschiedene effektive Stromstärken durch die H-Feld-erzeugende Spule. Dabei erhöhten wir die Stromstärke so lange, bis die Sättigung deutlich zu erkennen war. In der Messreihe B untersuchten wir den Einfluss eines Spaltes im Eisenkern. Dazu haben wir unterschiedliche viele Papierschichten in den Kern eingebracht.

- Aus den Hysteresekurven im Anhang liest man die Spannung, die der Sättigungsinduktion entspricht, als die y-Koordinate des Punktes an dem die Kurve zusammenläuft ab. Die Spannung, die der Remanenz entspricht, erhält man als y-Koordinate des Punktes bei $U_x \sim H = 0$. Und für die Koerzitivfeldstärke liest man die x-Koordinate des Punktes bei $U_y \sim B = 0$. Siehe hierzu auch Messkurve A2 im Anhang.
 - y-Spannung, die der Sättigungsinduktion entspricht: $U_s = 34 \text{ mV}$
 - y-Spannung, die der Remanenz (ohne Papier) entspricht: $U_{r,0} = 25 \text{ mV}$
 - y-Spannung, die der Remanenz (mit 1 Lage Papier) entspricht: $U_{r,1} = 10 \text{ mV}$
 - y-Spannung, die der Remanenz (mit 4 Lagen Papier) entspricht: $U_{r,4} = 3 \text{ mV}$
 - x-Spannung, die der Koerzitivfeldstärke entspricht: $U_c = 220 \text{ mV}$
- Weitere gemessene Größen:
 - Kernquerschnittsfläche: $A = (39 \text{ mm})^2 = 1521 \text{ mm}^2$
 - mittlerer Umfang: $U = 440 \text{ mm}$
 - Länge der Erzeugerspule: $l_1 = 45 \text{ mm}$

- Gegebene Größen:
 - Windungszahl der Erzeugerspule: $n_1 = 30$
 - $R_1 = 0.01\Omega$
 - $R_2 = 520\text{ k}\Omega$
 - $C = 1\mu\text{F}$

2.3 Auswertung

2.3.1 Interpretation der Spannungen am Oszilloskop

Die Oszilloskopspannung für die x-Achse wird am Widerstand R_1 abgegriffen. Es gilt für das erzeugte H-Feld unter der Annahme es handle sich um eine lange Zylinderspule:

$$H = \frac{n_1}{l_1} I_{\text{Sp}} = \frac{n_1}{R_1 l_1} \cdot U_x \quad (3)$$

Die y-Achsenspannung wird am Kondensator abgegriffen. Es gilt in guter Näherung:

$$U_y = U_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt \quad (4)$$

Mit der Induktionsspannung $U_{\text{ind}} = IR_2$: und dem Induktionsgesetz $U_{\text{ind}} = -n_2 \dot{\Phi}$ folgt :

$$U_y(t) = \frac{1}{R_2 C} \int_0^t U_{\text{ind}}(t) dt = -\frac{n_2}{R_2 C} \int_0^t \dot{\Phi}(t) dt = -\frac{n_2}{R_2 C} \Phi(t) = -\frac{n_2}{R_2 C} B(t) A \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow B = \frac{R_2 C}{n_2 A} \cdot U_y \quad (6)$$

wobei A die Querschnittsfläche des Kerns ist.

2.4 Ergebnisse

Mit dem Formeln (6) und (3) berechnet man die gesuchten Größen:

- Sättigungsinduktion (unabhängig von der Anzahl der Papierlagen): $B_s = \frac{R_2 C}{n_2 A} \cdot U_s = 1.267\text{ T}$
- Remanenz (ohne Papier): $B_{r,0} = \frac{R_2 C}{n_2 A} \cdot U_r = 0.931\text{ T}$
- Remanenz (mit 1 Lage Papier): $B_{r,1} = 0.373\text{ T}$
- Remanenz (mit 4 Lagen Papier): $B_{r,4} = 0.112\text{ T}$
- Koerzitivfeldstärke (unabhängig von der Anzahl der Papierlagen): $H_c = 14670 \frac{\text{A}}{\text{m}}$

2.5 Fehlerbetrachtung

Nehmen wir die gegebenen Werte für Widerstände und Kapazitäten als relativ genau an, so bleiben folgende mögliche Fehlerquellen:

- Die H-Felderzeugende Spule kann nicht als lang angenommen werden, so dass das von uns ermittelte H-Feld und damit die Koerzitivfeldstärke nur eine Näherung an die Realität ist.

- Die gemessenen Spannungswerte sind natürlich nur so gut wie einerseits die Rasterung des Speicheroszilloskops stimmt, als auch was Ablesegenauigkeit angeht.
- Die Baugrößen von Spule und Eisenkern unliegen auch möglichen Messfehlern.
- Bei der Berechnung der Spannung an der Integratorschaltung haben wir eine Näherung verwendet.

Vergleichen wir unseren Sättigungsinduktionswert für Eisen von 1,267 Tesla mit einem Beispiel aus dem Gerthsen, der für die Sättigung von handelsüblichem Eisen einen Wert von geringfügig mehr als 1 Tesla angibt, so lässt sich ein Fehler von nicht mehr als 25% annehmen.

3 Fragen und Aufgaben

3.1 Wann stößt die Näherung, die bei der Betrachtung der RC-Integratorschaltung gemacht wurde, an ihre Grenze?

Die Zeitkonstante $\tau = RC$ muss groß gegenüber der Periodendauer der angelegten Wechselspannung $T = 1/f = 0.02 \text{ s}$ sein. Der Kondensator darf nur wenig geladen werden.

3.2 Erklären sie die Scherung der Hysteresekurve beim Einbringen des Papiers.

Die Größe μ_r wird durch das Papier verkleinert. Folglich ist ein größeres H-Feld nötig, um dieselbe B-Feldstärke zu erreichen. Die Sättigungsfeldstärke des Eisen bleibt jedoch unverändert, es gibt also keine Streckung.

3.3 Wie erklären Sie sich die Punktsymmetrie der Hysteresekurve um den Nullpunkt?

Die Kurve muss symmetrisch sein, da es (bis auf Vorzeichen) keine Rolle spielt, in welche Richtung das Eisen polarisiert wird.

3.4 Was versteht man unter Weißschen Bezirken? Was sind Bloch-Wände?

siehe 1.3

3.5 Zeigen Sie, dass der Flächeninhalt der Hysteresekurve ein Maß für die Energie ist, die beim einmaligen Umfahren der Kurve als Wärmeverlust auftritt.

Die Hysteresekurve ist der Graph der Funktion $B(H)$. Das Integral $\int B dH$, welches dem Flächeninhalt der Hysteresekurve entspricht. Das Integral der oberen Kurve (d.h. die Fläche unter dieser Kurve) ist die Energie, die notwendig ist um das magnetische Feld aufzubauen; das Integral der unteren Kurve ist die beim Abbau wiedergewonne Energie. Die Differenz ist folglich der Energieverlust.

3.6 Anforderungen an Materialien für Permamagnete, Elektromagnete und Transformatoren

Für Elektromagnete verwendete man gerne magnetische weiche Ferromagnete. Sie haben möglichst wenig Gitterfehler und damit eine schmale Hysteresekurve, um eine berechenbare (anfangs quasi lineare) Magnetfeldverstärkung zu erhalten.

Auch die Hysteresekurve von Trafos sollte auf Effizienzgründen mit möglichst geringer Energie umlaufen werden, was einer schmalen Hysteresekurve entspricht.

Permanentmagneten hingegen benötigen eine hohe Remanenz, was durch eine hohe Anzahl von Gitterfehlern erreicht wird.

3.7 Was ändert sich beim Übergang zu einem offenen ferromagnetischen Kern?

Die Suszeptibilität nimmt am Rand ab, da die Ausrichtung nur noch von einer Richtung erfolgt. Analog zum Versuch mit Papier benötigt man eine höhere H-Feldstärke, um den Kern vollständig zu Polarisieren.

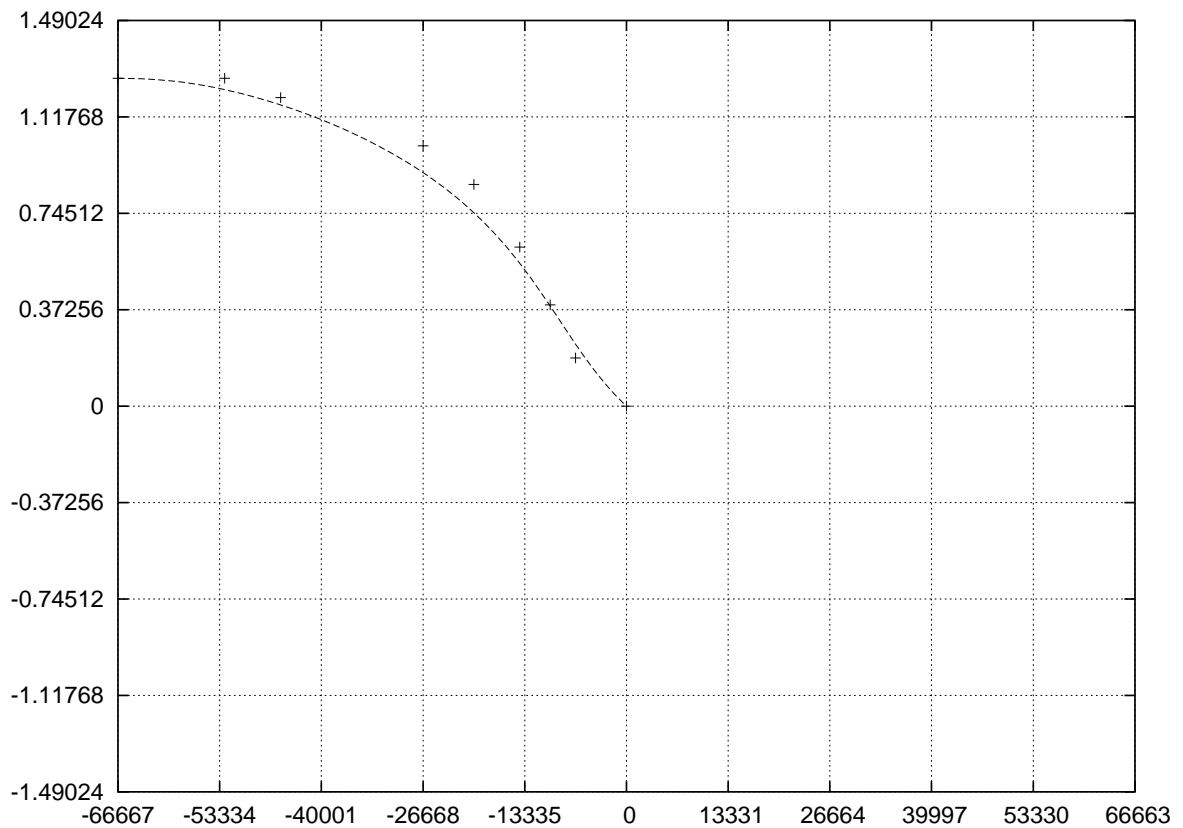
3.8 Erklären Sie die Messung der Neukurve mit der in diesem Versuch verwendeten Anordnung

Wir haben die Hysteresekurve bei verschiedenen Stromstärken gemessen und ermittelten die Neukurve als die Ortskurve der Umkehrpunkte. Diese Umkehrpunkte müssen Punkte der Neukurve sein, da man von jedem Punkt der Neukurve aus eine Hystereseschleife beginnen kann.

Umkehrpunkte:

Messung	U_x [mV]	U_y [mV]	H [A/m]	B [T]
A2	1000	34	66667	1.27
A1	790	34	52667	1.27
A3	680	32	45333	1.19
A4	400	27	26667	1.01
A5	300	23	20000	0.86
A6	210	16.5	14000	0.61
A7	150	10.5	10000	0.39
A8	100	5	6667	0.19

Wir ermittelten die Neukurve als Fit durch diese Punkte: (Die Skala ist auf die Skala des Oszilloskopes geeicht.)



3.9 Wie müssen Sie vorgehen, um den Eisenkern wieder zu entmagnetisieren?

Verringert man langsam die effektive Stromstärke des anliegenden Wechselstroms, so wird die Polarisierung des Eisens durch wechselseitige Umpolung des Magnetfeldes bei stetig sinkender Neupolarisierung des Eisens wieder aufgehoben.

Alternativ könnte man die Frequenz des Wechselfeldes erhöhen oder das Eisen auf eine Temperatur überhalb der Curie-Temperatur erhitzen.

Anhang:

Messprotokoll und Ausdrücke des Speicheroszilloskops: