

Versuch 240

Hysterese der Magnetisierung von Eisen

Lernziel: Das Verhalten ferromagnetischer Stoffe im Magnetfeld soll untersucht werden. Die begriffliche Unterscheidung der Größen Magnetische Flussdichte, Magnetische Feldstärke und Magnetisierung (von Materie) sowie Verfahren zu ihrer Messung sollen erlernt werden.

Kenntnisse: Kenngrößen¹ von Magnetfeldern: Magnetische Flussdichte \vec{B} , Magnetische Feldstärke \vec{H} , Magnetischer Fluss Φ , Induktion, Magnetisierung \vec{M} ; Materie im Magnetfeld: Suszeptibilität, Ursachen von Dia-, Para- und Ferromagnetismus; Makroskopische Effekte des Ferromagnetismus, Neukurve (jungfräuliche Kurve), Hystereseschleife, Sättigungsfeld, Remanenzflussdichte, Koerzitivfeldstärke, magnetisch weich und hart, Permeabilität, atomphysikalische Deutung und Temperaturabhängigkeit; Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld, Halleffekt, Hallsonde; Maßeinheiten: Tesla, Gauß, Oersted.

Sicherheitshinweise: Beachten Sie, dass die Ausgangsspannung des Regel-Trenn-Transformators bis zu 230 V beträgt. Stecken Sie die aus dem Trenn-Transformators herauskommenden Sicherheitskabel nur in die dafür vorgesehenen Buchsen an den Spulen.

Literatur: Jedes Grundkurs-Lehrbuch der Experimentalphysik;
Feynman, Lectures, Bd. 2, Kap. 34–37;
Demtröder, Experimentalphysik 2 (Elektrizität und Optik), Kap. 3;
Praktikumslehrbücher: Westphal, Geschke, Walcher
Weizel, Theoretische Physik I, Kap. C III, §15.

Eigenes Material: Für das Abspeichern und den Transfer der Messdaten ist ein eigener USB-Stick (USB 2.0) mitzubringen.

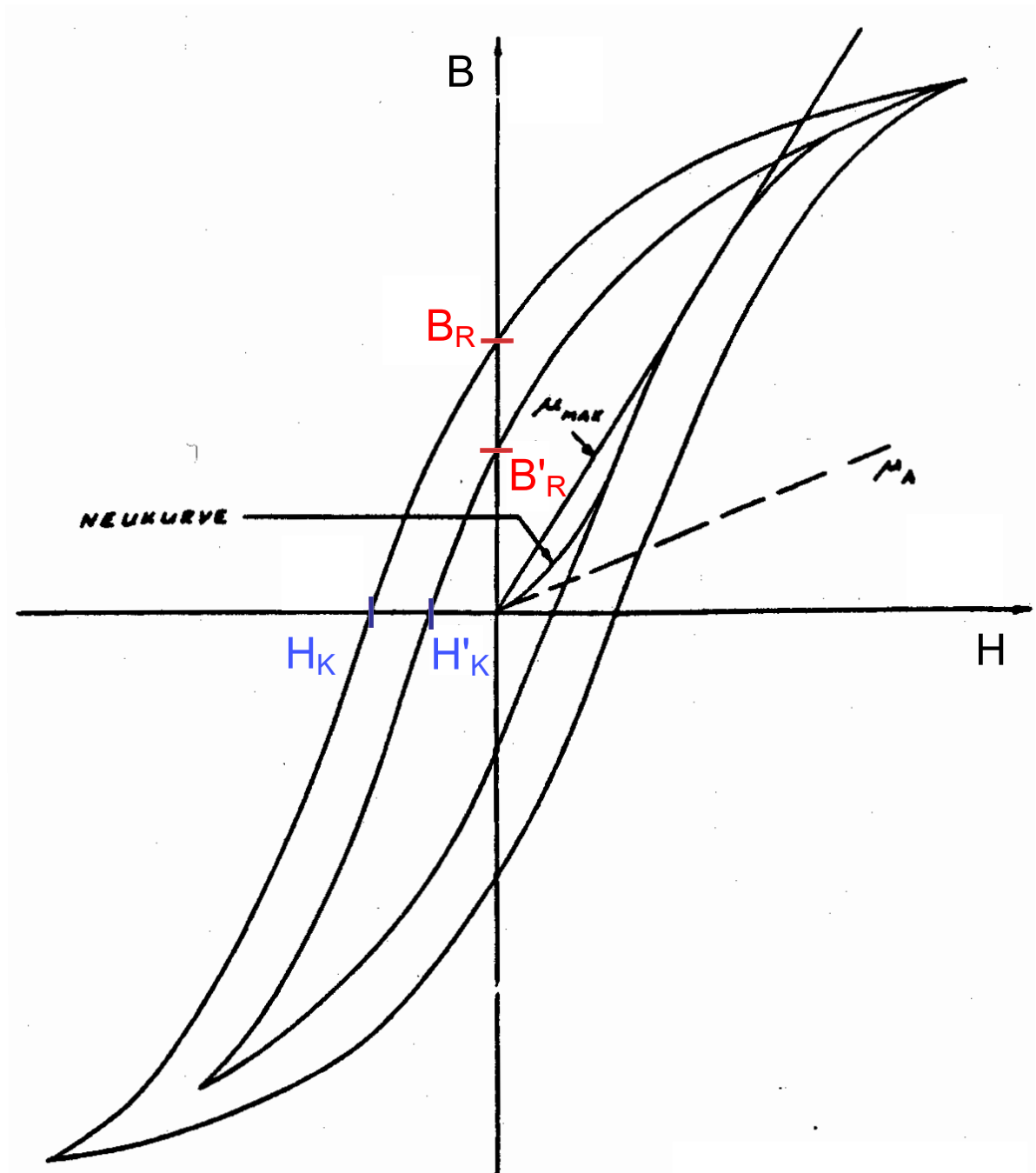


Abbildung 240.1: Hysteresekurve eines Ferromagneten mit Neukurve, Hystereschleife, anfängliche und maximale Permeabilität, Remanenzflussdichte und Koerzitivfeldstärke.

240.1 Erläuterungen

240.1.1 Zur Hysterese

Aufgabe 240.A: Notieren Sie die für diesen Versuch notwendigen Maxwellgleichungen und erklären Sie wofür diese benötigt werden.

Aufgabe 240.B: Zeigen Sie den Zusammenhang zwischen magnetischer Suszeptibilität, Magnetisierung und magnetischer Flußdichte.

Aufgabe 240.C: Wie verhält sich die magnetische Flußdichte in Abhängigkeit vom Magnetfeld für sehr große Magnetfelder, d.h. im Sättigungsbereich?

Abb. 240.1 zeigt das magnetische Verhalten eines ferromagnetischen Stoffes, spez. Eisen. Wird das Eisen (längs der Neukurve) bis zur Sättigung und dann weiter zyklisch magnetisiert, so durchläuft $B = f(H)$ die äußere Hysteresekurve. Beginnt man die zyklische Magnetisierung schon, bevor die Sättigung erreicht ist, so ergibt sich eine solche innere Schleife. Aus diesen Kurven lassen sich die für das spezielle Eisen charakteristischen Größen gewinnen: die *Remanenzflußdichte* B_R , die *Koerzitivfeldstärke* H_K , sowie die *Anfangspermeabilität* μ_A (Steigung der Neukurve im Nullpunkt) und die *maximale Permeabilität* μ_{\max} (Steigung der Tangente vom Nullpunkt an die Neukurve).

Zur Bestimmung dieser Größen für Eisen dient hier ein Eisenkern (siehe Abb. 240.2), wie man ihn beim Transformator antrifft (Trafo-U mit Joch). Auf dem Kern sitzen zwei gleiche Spulen (je 500 Windungen, $R = 2,5 \Omega$), die so von Strom durchflossen werden, dass die erzeugten Magnetfelder sich verstärken. Aus dem Eisenkern ist ein Luftspalt² ausgeschnitten, der über den gesamten Querschnitt des Eisenkerns geht. Die Schlitzweite d ist klein gegen die Querabmessungen des Eisenkerns. Damit ist gewährleistet, dass das Magnetfeld im Luftspalt homogen ist (d.h. der Streufluss ist vernachlässigbar).

Sind \vec{H}_{Fe} , \vec{H}_L und \vec{B}_{Fe} , \vec{B}_L die magnetischen Erregungen bzw. Feldstärken im Eisen und im Luftspalt und ist ℓ_{Fe} die mittlere Länge des Eisenringes (ohne Luftspalt), so gelten folgende Beziehungen:

$$\vec{B}_{\text{Fe}} = \vec{B}_L \quad \text{und} \quad \oint_C \vec{H} d\vec{s} = H_{\text{Fe}} \cdot \ell_{\text{Fe}} + H_L \cdot d = N \cdot I. \quad (240.1)$$

Aufgabe 240.D: Warum gilt die Beziehung $\vec{B}_{\text{Fe}} = \vec{B}_L$?

C ist irgendein geschlossener Integrationsweg, der alle Windungen einmal durchstößt. Hier sei es der Weg durch die Mitte des Eisenkerns und des Luftspaltes. Wegen $B_{\text{Fe}} = B_L = \mu_0 \cdot H_L$ gilt

$$H_{\text{Fe}} = \frac{N \cdot I}{\ell_{\text{Fe}}} - \frac{d}{\mu_0 \cdot \ell_{\text{Fe}}} \cdot B_{\text{Fe}}. \quad (240.2)$$

¹ In den Lehrbüchern herrscht eine gewisse „Beliebigkeit“ in der Namensgebung der Kenngrößen von Magnetfeldern, die sich z.T. aus der historischen Entwicklung verstehen lässt:

\vec{B} = magnetische (Kraft-)Flußdichte: Magnetfeld, magnetische Feldstärke, magnetische Induktion

\vec{H} = magnetische Feldstärke: Magnetfeld, magnetische Erregung

Englisch: magnetic flux density; magnetic field strength; magnetisation

² Als Luftspalt wird das Stück des Ringes bezeichnet, in dem ein unmagnetischer Stoff – wie Luft es ist – eingesetzt ist. Hier ist es der Kunststoff Trovidur. Dies geschieht aus mechanischen Gründen, um das nicht ganz U-förmige Trafoeisen mit dem Querjoch abschließen zu können.

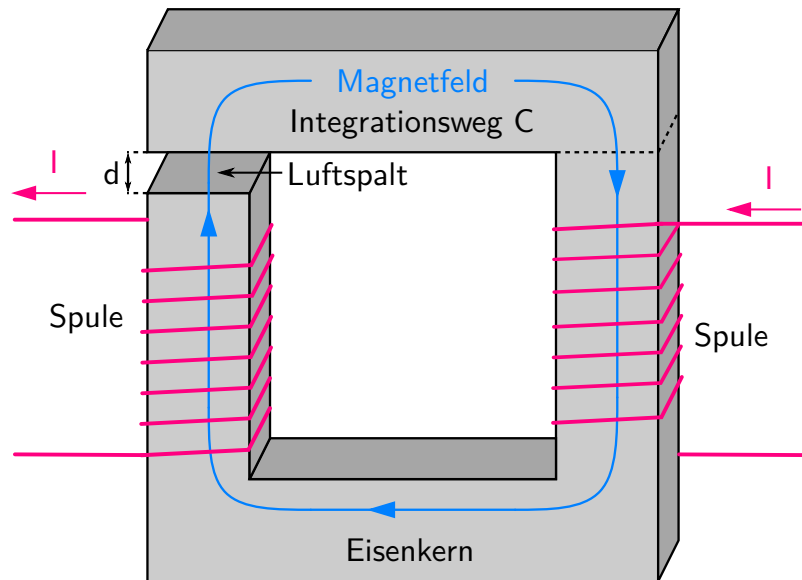


Abbildung 240.2: Eisenkern (Länge $l = (477 \pm 4)$ mm) mit zwei Spulen und einem Luftspalt (Breite $d = (2,00 \pm 0,05)$ mm).

$B_{\text{Fe}} = B_{\text{L}}$ wird im Luftspalt gemessen und daraus H_{Fe} berechnet.

240.1.2 Halleffekt und Hallsonde

Durch einen flachen, streifenförmigen Leiter, der senkrecht von einem Magnetfeld der Flussdichte \vec{B} durchsetzt wird, fließe ein Strom I senkrecht zum Magnetfeld (siehe Abb. 240.3). Auf die Ladungsträger mit der Ladung q des Stroms wirkt die Lorentzkraft \vec{F} . Da alle Vektoren senkrecht aufeinander stehen, gilt für die Beträge:

$$F = q \cdot v_d B, \quad (240.3)$$

wobei v_d die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger des Stroms im Leiter ist. Im Leiter werden die Ladungsträger auf gekrümmte Bahnen gezwungen. Wenn deren Krümmungsradius groß gegen die Abmessungen des Streifenleiters ist, dann sammeln sich Ladungsträger an einem Rand des Streifenleiters. Diese Ladungsträger fehlen am anderen Rand des Leiters, wo sich eine gleich große Sammlung von Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen aufbaut. Die so getrennten Ladungsträger erzeugen ein elektrisches Feld \vec{E} , dessen zugehörige Kraft der Lorentzkraft entgegen gerichtet ist. Die Potentialdifferenz, die sich zwischen den Rändern aufbaut, nennt man Hallspannung³. Bezeichnet man die Breite des Leiters mit b (siehe Abb. 240.3), so ergibt sich im Gleichgewicht der Kräfte eine Hallspannung

$$U_H = Eb = v_d Bb. \quad (240.4)$$

³ E.H. Hall: On a New Action of the Magnet on Electric Currents. *American Journal of Mathematics* 2, 287-292 (1879)

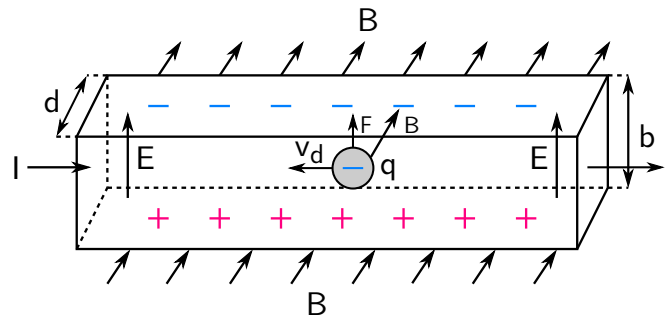


Abbildung 240.3: Halleffekt am Beispiel von negativen Ladungsträgern: Das Magnetfeld steht senkrecht auf dem Streifenleiter der Breite b und Dicke d . Der (technische) Strom I fließt von links nach rechts durch den Leiter. Am oberen und unteren Rand des Streifenleiters sammeln sich Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens und bauen ein elektrisches Feld E im Leiter auf.

Der Strom I beträgt

$$I = n \cdot q \cdot v_d A, \quad (240.5)$$

wobei n die Ladungsträgerdichte (Ladungen pro Volumen) im Leiter und $A = b \times d = \text{Breite} \times \text{Dicke}$ seine Querschnittsfläche ist. I wird auch Steuerstrom genannt. Damit wird die Hallspannung (eliminiere v_d):

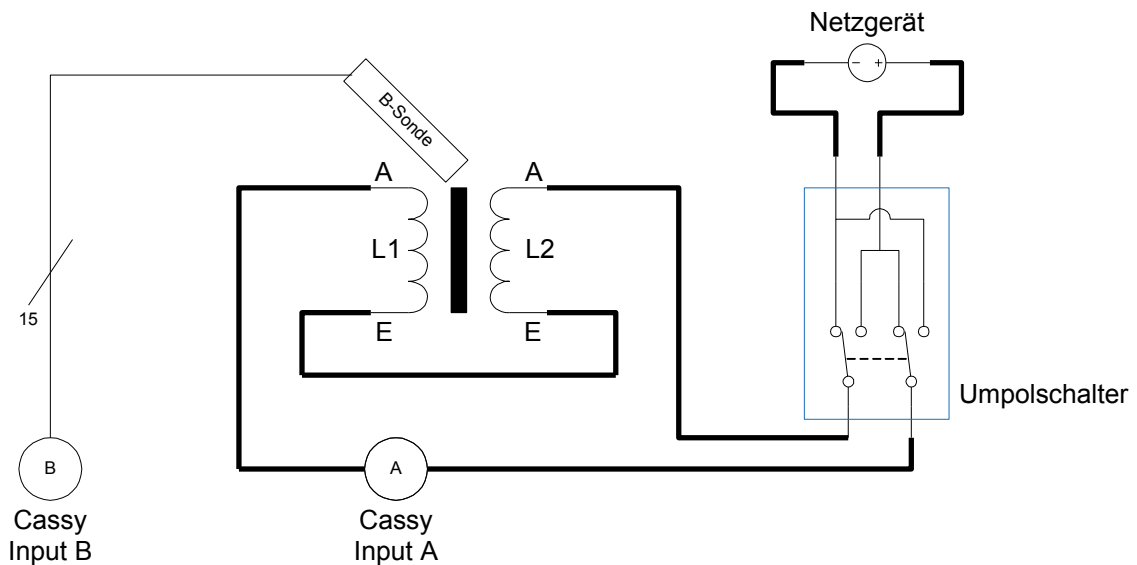
$$U_H = \frac{IB}{nqd} = A_H \frac{I}{d} B = S_H B. \quad (240.6)$$

Die Hallkonstante A_H charakterisiert die Eigenschaften des Leitermaterials. Halbleiter haben niedrige Ladungsträgerdichten n und damit (relativ) hohe Hallspannungen, die dann (relativ einfach) messbar werden. Häufig werden GaAs und InSb eingesetzt. Halbleiter weisen generell eine Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerdichte auf, deren Stärke den erlaubten Bereich der Umgebungstemperatur einschränkt. Bei der Umsetzung des Prinzips in praktisch nutzbare Geräte treten weitere Effekte („Fertigungstoleranzen“) auf, die z.T. mit speziellen Schaltungen⁴ umgangen werden können. Damit muss die Sondenempfindlichkeit S_H geeicht werden.

240.2 Versuchsanordnung

Abb. 240.4 zeigt die elektrische Schaltung des Versuchsaufbaus und listet die benutzten Geräte auf. Die Kombi B-Sonde enthält zwei Hallsonden aus GaAs mit einer Fläche von je $0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$. Die Flächen sind so angeordnet, dass mit einer der Sonden das Magnetfeld senkrecht zur Trägerachse (tangentielle Sonde) und mit der anderen das Feld parallel zur Trägerachse (axiale Sonde) nachgewiesen wird. Die Sonden sind linear im Messbereich (0 – 1000) mT und können bis 2 T messen, was jedoch eine detaillierte Eichung des nichtlinearen Bereichs oberhalb 1 T erfordert. Die relative Genauigkeit beträgt 3% bei einer Sondentemperatur von 20°C .

⁴ L. J. van der Pauw, *Philips Research Reports* 13, 1-9 (1958)



Geräteliste:

Labornetzgerät ((0 – 16) V, (0 – 5) A)

Umpolschalter (Kreuzschalter)

Sensor-Cassy USB zur Strommessung

Kombi B-Sonde für Cassy zur Messung des Magnetfelds

Eisenkern (Trafo-U-Eisen mit Joch und Spannvorrichtung)

2 Spulen mit je 500 Windungen und $R = 2,5 \Omega$ in Reihe geschaltet

6 PVC-Messleitungen ($\varnothing 4 \text{ mm}$)

Abbildung 240.4: Beschaltung des Hystereseversuchs. Information zur Datenaufnahme mit dem Cassy System in Anhang [A3.2](#).

240.3 Versuchsdurchführung

Achtung: Gefahr eines mechanischen Bruchs des Hallsondenträgers. Vorsichtig handhaben!

Nach dem Einschalten des Rechners wird das Betriebssystem Windows gestartet. Das System ist so konfiguriert, dass der PC nach jedem Reboot wieder in seinen Ursprungszustand zurückgesetzt wird. Außerdem können Daten ausschließlich auf einem USB-Stick gespeichert werden. Bitte bringen Sie daher zum Versuch einen USB-Stick mit. Nachdem das Betriebssystem Windows fertig geladen ist, startet man mit dem Icon Hysterese das Aufnahmeprogramm (Cassy).

Aufgabe 240.a: Entmagnetisierung: Der Eisenkern zeigt im Allgemeinen eine Restmagnetisierung. Diese muss vor dem eigentlichen Versuch beseitigt werden. Dazu schließt man die Magnetspulen an einen Regeltrafo (Wechselspannung $U = (0 - 260) \text{ V}$) an und fährt den Ausgangsstrom kurzzeitig von 0 A bis 4 A hoch und sofort wieder zurück auf 0 A. (Vorsicht: Oberhalb von 4 A spricht die Sicherung an.)

Frage: Brauchen Sie den Umschalter bei der Entmagnetisierung? Warum?

Auf diese Weise wird der Eisenkern bis in die Sättigung gebracht, er durchläuft die größtmögliche Hysteresekurve. Bei der dann folgenden Abnahme der Amplitude des erregenden Stromes (Abnahme der H -Amplitude) ziehen sich die Schleifen auf den Nullpunkt zusammen. Anschließend muss eine Kontrollmessung mit der Hallsonde durchgeführt werden.

Aufgabe 240.b: B-Messung: Mit der Schaltung in Abb. 240.4 wird \vec{B} mit Hilfe der Hallsonde im Luftspalt des Eisenkern als Funktion des erregenden Stromes I gemessen, d.h. Neukurve messen bis zum maximal erreichbaren I , Hysteresekurve durchmessen. Die Ströme sind so zu wählen, dass weder das Magnetfeld $|\vec{B}|$ im Luftspalt 1 T, noch der Strom $|I|$ durch die Spulen 3 A überschreiten (Messbereich des Cassy-Systems).

Aufgabe 240.c: Auswertung: Es ist das wahre H [A/m] im Eisen aus B und I zu berechnen. In einem Diagramm ist B gegen H aufzutragen. Aus dem Diagramm sind μ_A und μ_{\max} in Maßeinheiten von μ_0 zu bestimmen.

Bemerkung: H_{Fe} ergibt sich hier als Differenz zweier ungefähr gleicher Grössen. Die Messungen müssen daher sehr sorgfältig durchgeführt werden.