

Versuch 240 - Hysteresis der Magnetisierung von Eisen

Es ist das Verhalten ferromagnetischer Stoffe im Magnetfeld zu untersuchen. Dabei werden Verfahren zur Messung der mag. Flussdichte, mag. Feldstärke und Magnetisierung erlernt und angewandt.

Hysteresis

Die Hysteresis das Verhalten magnetischer Materialien, bei denen es zur sogenannten Remanenz kommt. Im Allgemeinen spricht man von Hysteresis, wenn die durch eine Ursache hervorgerufene Änderung mit Verzögerung eintritt. Für ferromagnetische Materialien bedeutet dies, dass ihre Magnetisierung sowohl vom von außen angelegten Magnetfeld, als auch vom ~~von~~ vorherigen Zustand des Materials. Abbildung 1 zeigt uns die qualitative Hysteresekurve (oft auch Magnetisierungskurve oder Hystereseschleife genannt) eines Ferromagneten. Die äußere Kurve wird

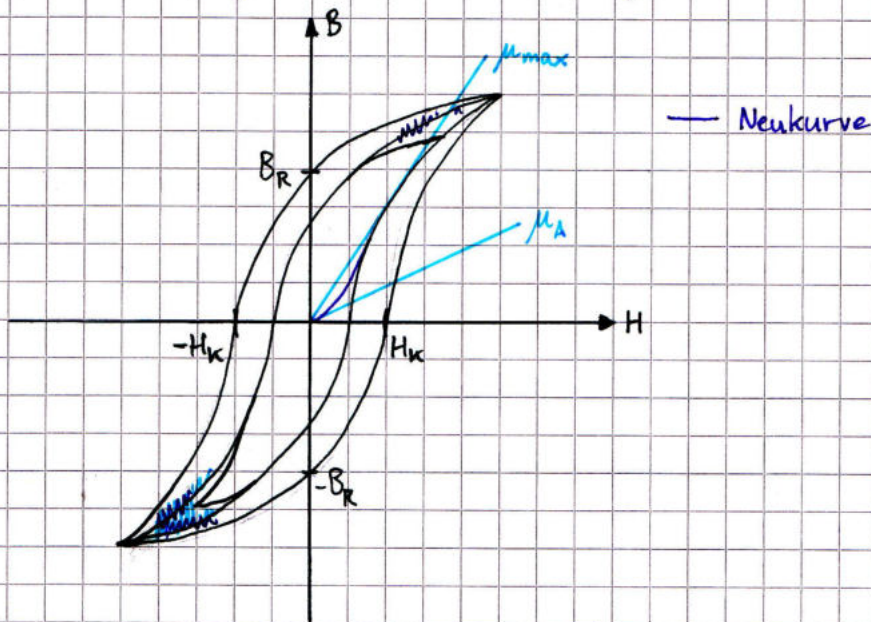


Abbildung 1 - Hysteresekurve mit Neukurve, Hystereseschleife, anfängliche Permeabilität μ_A und maximale Permeabilität μ_{\max} , Remanenzflussdichte B_R und Koerzitivfeldstärke H_K .

durchlaufen, wenn das Material bis Sättigung zyklisch magnetisiert wird. Bei der inneren Kurve wird die Sättigung nicht erreicht. Die zyklische Magnetisierung beginnt bereits vor ihrem Erreichen. Aus der Hysteresekurve lassen sich nun die Remanenzflussdichte B_R , die

Querschnittsfläche H_K , sowie die Anfangspermeabilität μ_0 und maximale Permeabilität μ_{max} bestimmen.

Aufbau & Theorie

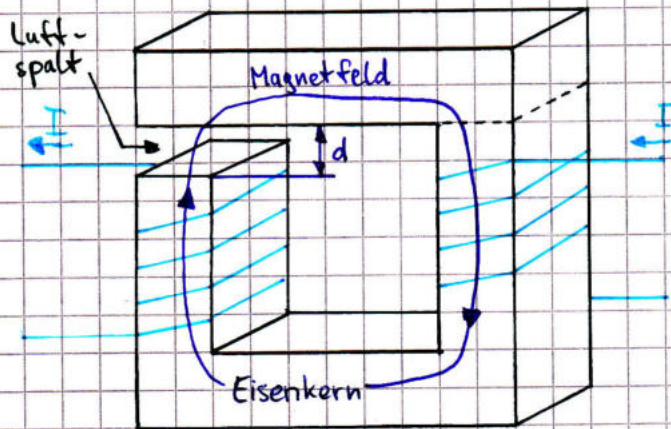


Abbildung 2 - Eisenkern (Länge $L = (477 \pm 4) \text{ mm}$) mit zwei Spulen und Luftspalt (mit $d = (2,00 \pm 0,05) \text{ mm}$).

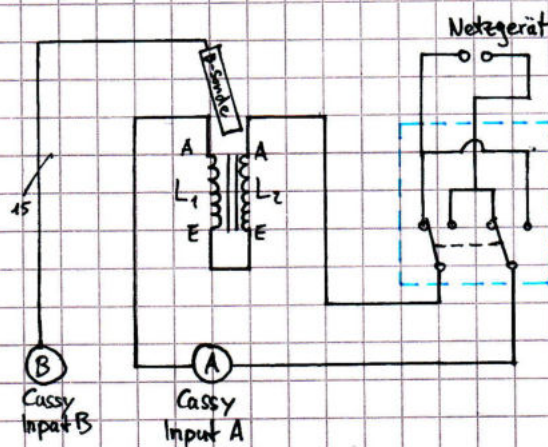


Abbildung 3 - Schaltung zur Aufnahme der Messdaten.

Abbildung 3 zeigt einen Transformator mit Eisenkern auf welchem zwei Spulen mit Windungszahl $n = 500$ und Leiterwiderstand von jeweils $R = 2,5 \Omega$. Im Eisenkern ist ein Luftspalt mit Spaltenweite $d = (2,00 \pm 0,005) \text{ mm}$, welcher klein gegenüber der Querschnittsfläche des Kerns ist. Es kann daher in erster Näherung die Annahme getroffen werden, dass Magnetfeld im Luftspalt homogen ist. Es gilt:

$$\vec{B}_{Fe} = \vec{B}_L \quad \text{und} \quad \oint_C \vec{H} d\vec{s} = H_{Fe} \cdot L_{Fe} + H_L \cdot d = N \cdot I, \quad (1)$$

wo H_{Fe}, H_L, B_{Fe}, B_L die mag. Erregungen bzw. Feldstärken im Eisen (Fe) und Luftspalt (L) sind. Dabei ist C ein geschlossener Integrationsweg, welcher durch sämtliche Windungen verläuft. Da $B_{Fe} = B_L = \mu_0 H_L$

gilt folglich:

$$H_{Fe} = \frac{N \cdot I}{L_{Fe}} - \frac{d}{\mu_0 L_{Fe}} \cdot B_{Fe}, \quad (2)$$

wobei $B_{Fe} = B_L$ mit Hilfe einer Hallsonde im Luftspalt gemessen werden.

Hallsonde

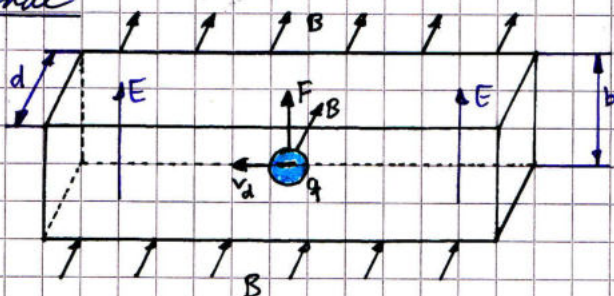


Abbildung 4 - Darstellung des Halleffekts an der Hallsonde

Fließt durch einen Leiter, welcher senkrecht vor einem Magnetfeld durchsetzt wird, ein Strom I , so verschieben sich die Elektronen (als negative Ladungsträger) aufgrund der Lorentzkraft. Es gilt (für $v_d \perp B$):

$$F_L = q \cdot v_d \cdot B \quad (3)$$

Da die Elektronen sich hierbei systematisch verschieben, lassen sie sich gleichmäßig positive vorstellen. Das dadurch resultierende el. Feld ist im stationären Zustand im Gegw. mit der Lorentzkraft, sodass hieraus sofort die Potentialdifferenz U_H als Spannung gemessen werden kann. Es gilt:

$$U_H = E \cdot b = v_d B b \quad (4)$$

Durch Kombination mit dem Strom $I = n \cdot q \cdot v_d \cdot A$ (wobei A die Querschnittsfläche ist) ergibt sich:

$$U_H = \frac{I B}{n q d} = A_H \frac{I}{d} B = S_H B, \quad (5)$$

wobei A_H die Hallkonstante genannt wird, und die Leitereigenschaften des Materials charakterisiert.

Für die Messungen werden tatsächlich zwei Hallsonden mit jeweils $0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$ verwendet. Die Sonden messen jeweils das Magnetfeld senkrecht und parallel zur Trägerachse.

Auswertung

240.a

Antwort: Bei der Entmagnetisierung wird der Umpolhalter nicht gebraucht, da diese im Wechselstrombetrieb geschaltet. Die Umpolung ist nur im Gleichstrombetrieb bei der Messung der Hystereschleife notwendig, um negative Spannungen und Ströme zu erzeugen (bzw. die Stromflussrichtung zu ändern).

Entmagnetisierung: $B_0 = (0 \pm 1) \text{ mT}$

240.b

Parameter des Messaufbaus:

- Messintervalle des CASSY: $t = 0,1 \text{ s}$

- Spulen: $N = 500 \Rightarrow N_{\text{Ges}} = 1000$ (da zwei Spulen)

$L = 9 \text{ mH}$ $R = 2,5 \Omega$ $I_{\text{max}} = 2,5 \text{ A}$

- Eisenkern: $l_{\text{Fe}} = (477 \pm 4) \text{ mm}$ $d = (2,00 \pm 0,05) \text{ mm}$

240.c

Abbildung 5 zeigt die Hystereschleife. Da die aufgenommene Datenumenge sehr umfangreich ist ($\approx 10^3$ Wertepaare inkl. Fehler), wird diese hier nicht explizit eingefügt. Die Werte, welche gemessen wurden sind ~~die~~ die Stromstärke durch die Spulen I und die von der Hallsonde gemessene mag. Flussdichte B im Luftspalt. Nach Messvorschrift gilt für die Unsicherheiten: $\Delta I = I/100$ und $\Delta B = B \cdot 0,03$.

Die Berechnung der mag. Feldstärke H_{Fe} lautet nach Gl. 2:

$$H_{\text{Fe}} = \frac{NI}{l_{\text{Fe}}} - \frac{d}{\mu_0 l_{\text{Fe}}} B_{\text{Fe}} \quad (2)$$

wobei $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ die magnetische Feldkonstante ist. Für den Fehler von ΔH_{Fe} gilt gemäß Gaußscher Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta H_{\text{Fe}} = \left[\left(\frac{\partial H_{\text{Fe}}}{\partial I} \Delta I \right)^2 + \left(\frac{\partial H_{\text{Fe}}}{\partial l_{\text{Fe}}} \Delta l_{\text{Fe}} \right)^2 + \left(\frac{\partial H_{\text{Fe}}}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial H_{\text{Fe}}}{\partial B} \Delta B \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

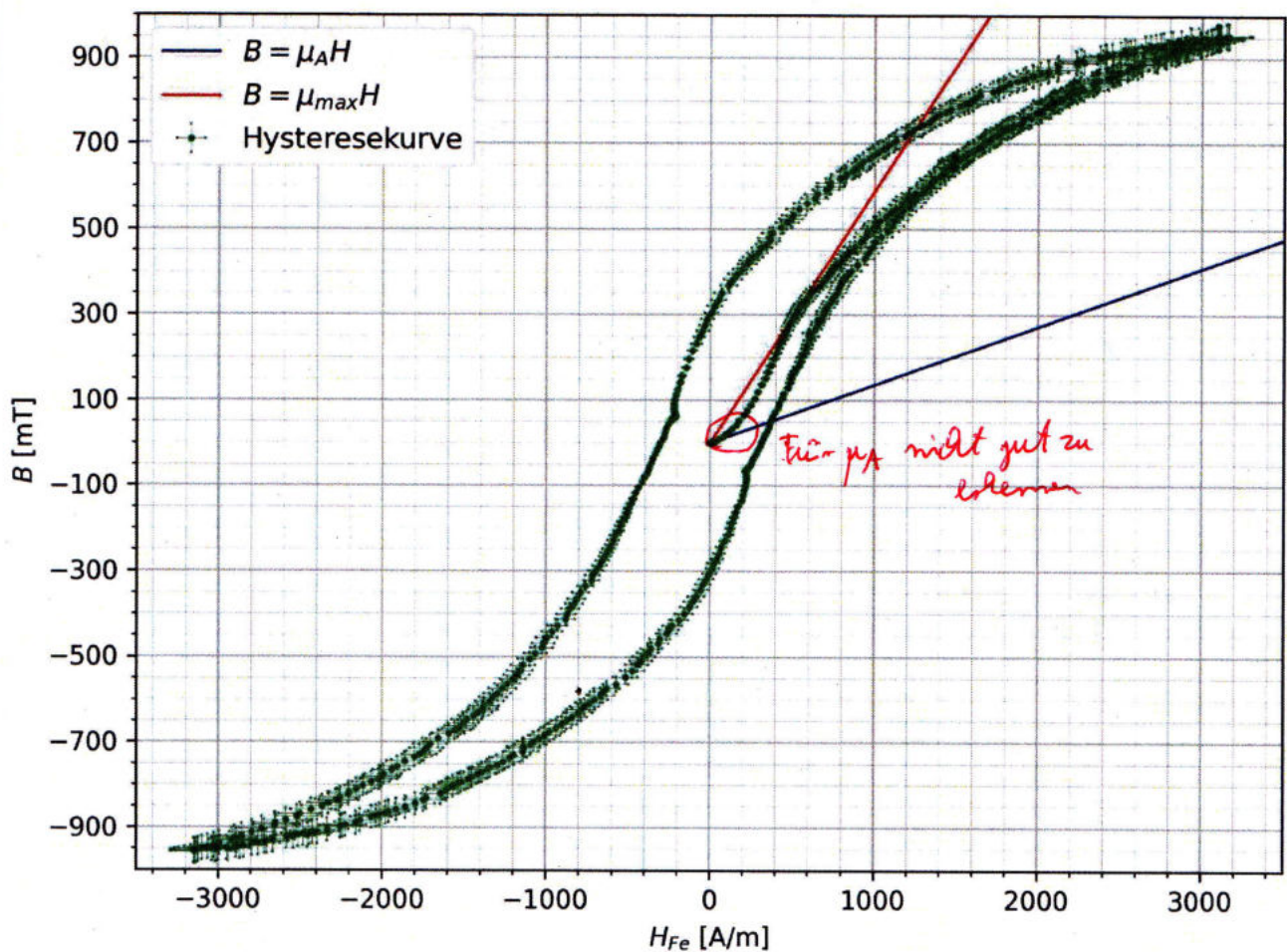


Abbildung 5 - Hysteresekurve mit Verlauf bei Sättigung (äußere grüne Kontur) und Minderkurve (vom Ursprung in S-Form in den 1. Quadranten). Die blaue (rote) Gerade beginnend im Ursprung zeigt die Lineare Regression $y = mx$ mit anfänglicher (maximaler) Permeabilität als Steigung.

wobei $\frac{\partial H_{Fe}}{\partial I} = \frac{N}{L_{Fe}}$, $-\frac{\partial H_{Fe}}{\partial I} = \frac{NI}{L_{Fe}^2} - \frac{dB_L}{\mu_0 L_{Fe}^2}$, $\frac{\partial H_{Fe}}{\partial d} = \frac{B_L}{\mu_0 L_{Fe}}$,

$$-\frac{\partial H_{Fe}}{\partial B_L} = \frac{d}{\mu_0 L_{Fe}} \quad \text{sind.}$$

Die anfängliche Steigung der Minderkurve ist die anfängliche Permeabilität μ_A .

Die hierfür gewählten Punkte sind einerseits der Ursprung $(0; 0)$

und den Punkt $(H_A, B_A) = (5,00 \pm 0,15) \text{ mT} ; (36,78 \pm 0,79) \text{ A/m} ; (5,00 \pm 0,15) \text{ mT}$.

Daraus ergibt sich mit $\mu_A = \frac{B_A}{H_A}$ und $\Delta \mu_A = \left[\left(\frac{\Delta H_A}{B_A} \right)^2 + \left(\frac{H_A \Delta B_A}{B_A^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$

$\mu_A = (135,957 \pm 50,17) \frac{\text{mT}}{\text{A/m}}$. Analog ergibt sich für μ_{max} :

$\mu_{max} = (587,132 \pm 51,035) \frac{\text{mT}}{\text{A/m}}$ mit $(H_{max}, B_{max}) = (514,36 \pm 42,00) \text{ A/m} ; (302 \pm 9) \text{ mT}$.

Stromach lässt sich einfach $\frac{\mu_A}{\mu_0}$ und $\frac{\mu_{max}}{\mu_0}$ berechnen. Man erhält:

$$\frac{\mu_A}{\mu_0} = 108 \pm 4 \quad \text{und} \quad \frac{\mu_{max}}{\mu_0} = 467 \pm 41$$

Der Literaturwert der Permeabilität von Eisen ist $300 \cdot 10^4$. (Lit.: chemie.de/Lexikon/Permeabilitätszahl.html) Damit liegt $\frac{\mu_{max}}{\mu_0}$ innerhalb des Literaturwerts.

Fazit

Zu Beginn der Durchführung der Messreihe war ein Defekt am Regeltransformator aufgrund von Dauerabgebrennter Lötung. Nach Ersetzen dieser war es möglich eine ~~A~~ ausgezeichnete Entmagnetisierung durchzuführen. Entsprechend konnte die Messung relativ gut aufgenommen werden, was sich in den Werten für μ_A und μ_{max} zeigt. Auch der Rest der Hysteresekurve zeigt einen gut erkennbaren und charakteristischen Hystereseverhalten eines Ferromagneten.

Zu Korrigieren:

240.c: Separates Diagramm für $\mu_A H = B$ zur besseren Lesbarkeit

Formel zur 240.c

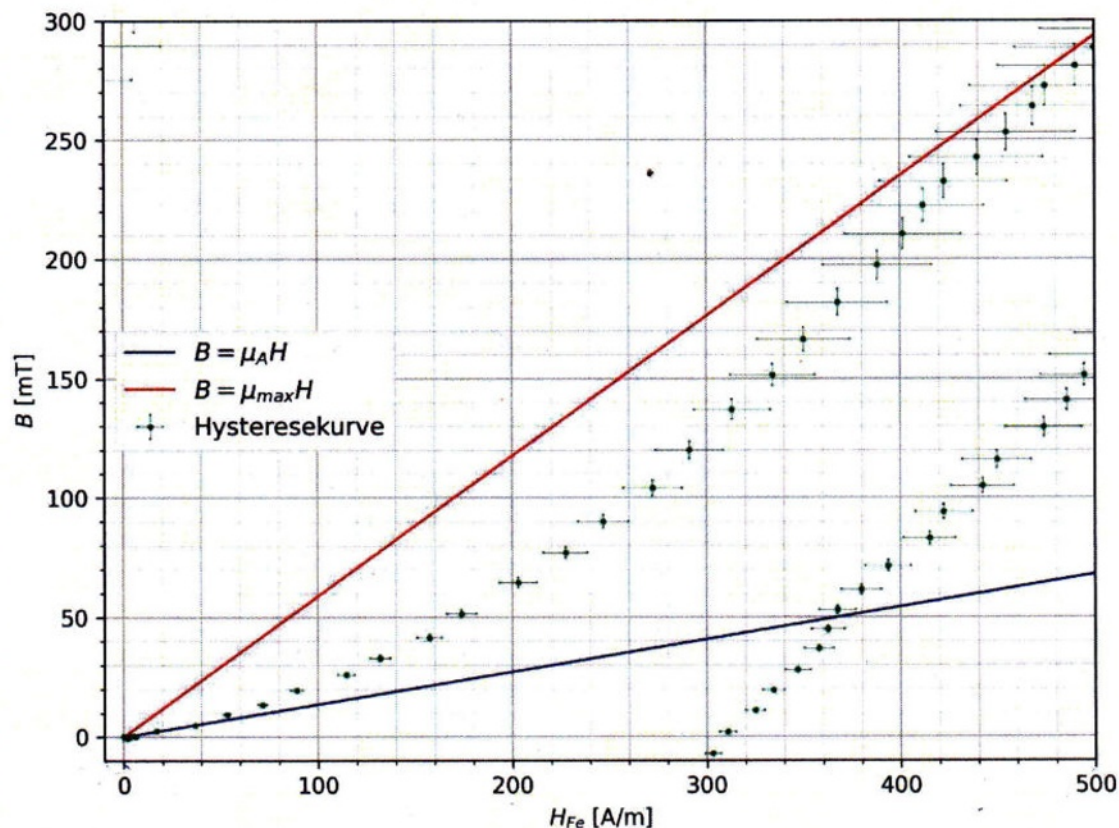


Abbildung 6 - Ausschnitt aus Abb. 5 zur Erläuterung von μ_A .

23.11.2023

Beranden