

Versuch P1-83

Ferromagnetische Hysteresis

Vorbereitung

Gruppe Mo-19
Yannick Augenstein

Versuchsdurchführung: Montag, 24.10.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule	2
1.1	Spuleninduktivität und Verlustwiderstand	2
1.2	Theoretische Berechnung	2
2	Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern	3
2.1	Spuleninduktivität und Verlustwiderstand	3
2.2	Relative Permeabilität	3
3	Ferromagnetische Hysteresis und Ummagnetisierungsverluste	3
3.1	Aufbau	3
3.2	Eichung	3
3.3	Ummagnetisierung $\int B \cdot dH$	4
3.4	Relative Wechselfeld-Permeabilität	5
3.5	Vergleich mit Aufgabe 2	5
4	Vergleich Eisen - Ferrit	5

1 Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule

1.1 Spuleninduktivität und Verlustwiderstand

Die Impedanz ist der (i.A. komplexe) Stromwiderstand

$$z = r + i\omega \cdot L$$

mit dem Scheinwiderstand

$$|z| = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$$

Zur Bestimmung von r und L wird die Spannung am Widerstand R und an der Spule sowie die Phase φ gesucht. Die gesuchten Größen ergeben sich aus

$$|z| = \hat{U} \cdot \frac{R}{\hat{U}_R} \quad , \quad r = |z| \cdot \cos \varphi \quad , \quad L = |z| \cdot \frac{\sin \varphi}{\omega}$$

1.2 Theoretische Berechnung

Mit den gegebenen Spulendaten führen wir eine theoretische Berechnung der zu erwartenden Werte L und R durch.

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

Da die Spule nicht lang ist, fließt in die obige Formel noch ein geometrisch bedingter Korrekturfaktor $k = 0,55$ mit ein. Somit ergibt sich für die Induktivität der Spule

$$L = 36,9 \cdot 10^{-3} H = 36,9 mH$$

Für den Draht gilt

$$E = \frac{U}{l} \quad , \quad j = \frac{I}{A} \quad , \quad \rho = \frac{E}{j}$$

Aus dieser Abhängigkeit ergibt sich letztendlich die Gleichung

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

in die wir unsere Werte einsetzen können. Somit ergibt sich aus der theoretischen Berechnung für R

$$R = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{A} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2\pi \bar{r} n}{\pi (\frac{1}{2})^2} = 8,55 \Omega$$

2 Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern

2.1 Spuleninduktivität und Verlustwiderstand

Die Messung verläuft analog zu der in Aufgabe 1, nur mit Eisenkern (μ verändert)

2.2 Relative Permeabilität

Statt der Länge der Spule ist nun die mittlere Länge der magnetischen Feldlinien ($\bar{l} = 0,48m$) ausschlaggebend. Damit entfällt der Korrekturfaktor k . Außerdem ist anzumerken, dass die magnetischen Feldlinien nun fast ausschließlich im Innern des Eisenkerns verlaufen. Die Querschnittsfläche ist somit auch auf den Eisenkern bezogen ($A_{Kern} = 0,039m \cdot 0,039m$). Somit ergibt sich die neue Spuleninduktivität

$$L = n^2 \cdot \mu \mu_0 \cdot \frac{A_{Kern}}{\bar{l}} \rightarrow \mu = \frac{\bar{l} \cdot L}{A_{Kern} \cdot \mu_0 n^2}$$

3 Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste

3.1 Aufbau

Wir bauen einen Primärstromkreis aus Ampèremeter, Spannungsquelle und Spule auf. Die Spule ist über einen Kern mit einer zweiten Spule an den Sekundärstromkreis gekoppelt, in dem sich ein R-C-Glied befindet.

3.2 Eichung

B und H lassen sich in diesem Versuch nicht direkt messen, sondern nur aus den Achsen am Oszilloskop (in Volt) ablesen/ausrechnen. Deshalb berechnen wir nun die entsprechenden Eichfaktoren für die x- und y-Achsen.

H-Achse:

$$H = \frac{n_1}{\bar{l} \cdot I_{eff}} \rightarrow H = \frac{n_1}{\bar{l} \cdot R} \cdot U_R$$

Der Faktor vor der Spannung ist der Eichfaktor α_1

$$\alpha_1 = \frac{n_1}{\bar{l} \cdot R} = \frac{1000}{0,48m \cdot 10\Omega} = 208,3 \frac{A}{Vm}$$

B-Achse: (R-C-Glied verwenden)

$$U_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \int I \cdot dt = \int \frac{U_{Ind} - U_C}{R_1} \cdot dt$$

R_1 und C müssen groß genug sein, damit $U_C \ll U_{Ind}$ gilt

$$U_C = \frac{1}{R_1 C} \cdot \int U_{Ind} \cdot dt$$

B-Feld über C:

$$B \approx \frac{1}{n_2 \cdot A} \cdot \int U_{Ind} \cdot dt \approx \frac{R_1 C}{n_2 \cdot A} \cdot U_C$$

Wieder ist der Faktor vor der Spannung der Eichfaktor:

$$\alpha_2 = \frac{R_1 C}{n_2 \cdot A} = \frac{100k\Omega \cdot 10\mu F}{50 \cdot (0,039m)^2} = 13,5 \frac{s}{m^2}$$

3.3 Ummagnetisierung $\int B \cdot dH$

$$\frac{W_{magn}}{V} = \int B \cdot dH = A_{Hystereseschleife}$$

Zur Bestimmung des Integrals werden wir die Hystereseschleife ausdrücken, wiegen und über die bekannte Dichte des Papiers ihren Flächeninhalt bestimmen.

$$P_{mag} = \frac{W_{mag} \cdot V}{V \cdot T_{Zyklus}} = \frac{W_{mag}}{T_{Zyklus}}$$

Der Verlustwiderstand lässt sich aus

$$I_{eff} \rightarrow r_{mag} = \frac{P_{mag}}{I_{eff}^2}$$

berechnen.

3.4 Relative Wechselfeld-Permeabilität

$$B = \mu\mu_0 \cdot H \quad \rightarrow \quad \mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$

Nun liest man einfach die Werte für B und H ab.

3.5 Vergleich mit Aufgabe 2

Wir werden die vorangegangenen Ergebnisse mit denen aus Aufgabe 2 vergleichen und interpretieren.

4 Vergleich Eisen - Ferrit

Nun führen wir dieselben Messungen noch einmal für Eisen und Ferrit bei veränderten Spulendaten durch und stellen jeweils die Hysteresekurven dar. Aus den Messwerten errechnen wir (oder wir lesen sie ab) die Remanenz, Koerzitivkraft, Ummagnetisierungsverlustleistung und die Sättigungsinduktion.

Versuch P1-83

Ferromagnetische Hysterese

Auswertung

Gruppe Mo-19
Yannick Augenstein
Patrick Kuntze

Versuchsdurchführung: Montag, 24.10.2011

Inhaltsverzeichnis

1	Induktivität und Verlustwiderstand einer leeren Spule	3
1.1	Messwerte	3
1.2	Interpretation der Messwerte	3
1.3	Vergleich zur theoretischen Berechnung	4
1.3.1	Spuleninduktivität	4
1.3.2	Drahtwiderstand und Verlustleistung	4
2	Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern	5
2.1	Messwerte	5
2.2	Interpretation der Messwerte	5
2.3	Bestimmung der relativen Permeabilität	6
3	Ferromagnetische Hysteresis	6
3.1	Formeln und Größen	6
3.2	Messwerte für $I_{eff} = 30mA$	8
3.3	Messwerte für $I_{eff} = 10mA$	9
3.4	Vergleich mit Aufgabe 2	10
4	Vergleich Eisen - Ferrit	11
4.1	Messwerte für Eisen	11
4.2	Messwerte für Ferrit	12
4.3	Vergleich Eisen - Ferrit	14

1 Induktivität und Verlustwiderstand einer leeren Spule

1.1 Messwerte

Größe	Messung 1	Messung 2	Herkunft
I (in mA)	300	30	eingestellt
R (in Ω)	10	10	gegeben
f (in Hz)	50	50	gegeben
U_R (in V)	8,37	0,845	gemessen
U_L (in V)	12,27	1,231	gemessen
Δt (in ms)	2,61	2,61	gemessen
φ (in Rad)	0,82	0,82	gerechnet
φ (in $^\circ$)	46,98	46,98	gerechnet
$ Z $ (in Ω)	14,66	14,57	gerechnet
R_I (in Ω)	10	9,94	gerechnet
L (in H)	0,034	0,034	gerechnet

Wobei U_R und U_L jeweils an den Spannungsspitzen gemessen wurden. Die anderen Werte wurden mit folgenden Formeln berechnet:

- $\varphi = 2\pi f \cdot \Delta t$
- $Z = \frac{U_L}{U_R} R$
- $R_I = |Z| \cdot \cos \varphi$
- $L = |Z| \cdot \frac{\sin \varphi}{2\pi f}$

1.2 Interpretation der Messwerte

Den Werten zufolge hängen offensichtlich weder der Verlustwiderstand R_I noch die Induktivität L von der Stromstärke ab.

Bis auf die Induktivität der Spule sind keine der gemessenen Werte angegeben. Laut Aufschrift besitzt die verwendete Spule eine Induktivität von $L = 0,044H$. Aus unseren Messungen ergibt sich ein Mittelwert von $\hat{L} = 0,034H$, was einer Abweichung von $\approx 23\%$ vom angegebenen Wert entspricht. Verwunderlich ist diese (doch recht große) Abweichung jedoch nicht, wenn man die Messmethoden und darauffolgende Rechnungen betrachtet: Zunächst geht die gemessene Zeitdifferenz Δt , die auf Grund des Versuchsaufbaus wohl doch recht fehlerbehaftet ist, zur Bestimmung von φ in die Rechnung ein. Auch der Verlustwiderstand $|Z|$, welchen wir gar aus zwei gemessenen Größen (U_L und U_R) errechnet haben, ist stark fehlerbehaftet.

Wir sehen, dass alle drei gemessene Größen in die Berechnung von L einfließen, also auch ihre entsprechenden Fehler mit in die Rechnung eingehen. Somit sind die 23% Abweichung ein vertretbarer, wenn auch recht unzufriedenstellender Wert.

Der errechnete mittlere Widerstand beträgt $\hat{R}_I = 9,97\Omega$.

1.3 Vergleich zur theoretischen Berechnung

1.3.1 Spuleninduktivität

Aus den gegebenen Spulendaten sollten wir (näherungsweise) die Spuleninduktivität er rechnen. Für eine lange Spule gilt:

$$L = \mu\mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l} = \mu\mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{\pi\hat{r}^2}{l}$$

In diese Formel wird noch ein Korrekturfaktor $k = 0,55$ eingeführt. Dieser lässt sich dadurch erklären, dass es sich bei unserer verwendeten Spule um keine ideale lange Spule handelt, sondern um eine reale (und zudem recht kurze). Es handelt sich hierbei also um eine Geometriebedingte Korrektur.

Auch die restlichen Werte sind vorgegeben und können einfach in die Formel eingesetzt werden.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}, \quad \mu_{Luft} \approx 1, \quad n = 1000, \quad \hat{r} = 0,034m, \quad l = 0,068m$$

Somit ergibt sich

$$L = 36,9 \cdot 10^{-3} H = 36,9mH$$

Das Ergebnis lässt sich als gute Bestätigung unserer Messungen bewerten. Von diesem theoretisch errechneten Wert weicht unser experimentell ermittelter um weniger als 8% ab. Das ist, wenn man oben genannte Fehlereinflüsse berücksichtigt, ein erstaunlich genauer Wert.

1.3.2 Drahtwiderstand und Verlustleistung

Zur Berechnung des Drahtwiderstandes benötigt man die Gleichungen

$$E = \frac{U}{l} \quad \text{und} \quad j = \frac{I}{A}$$

Aus $\rho = \frac{E}{j}$ folgt

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Die bekannten Werte $\rho_{Cu} = 1,54 \cdot 10^{-8} \Omega m$ und der Drahtdurchmesser $d = 0,7 \cdot 10^{-3} m$ kann man nun in obige Gleichung einsetzen und erhält

$$R = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{A} = \rho_{Cu} \cdot \frac{2\pi\hat{r}n}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} = 8,55\Omega$$

Dieser Wert für den Drahtwiderstand weicht um $\approx 17\%$ von dem von uns gemessenen Wert für den Verlustwiderstand der Spule ab. Dies legt (unter Berücksichtigung von Messfehlern) die Vermutung nahe, dass der Draht- und der Verlustwiderstand der Spule

zumindest ähnlich sind.

Die Verlustleistung ergibt sich aus $P = R_I \cdot I^2$ und beträgt somit

$$P(30mA) = 10\Omega \cdot (0,03A)^2 = 9mW$$

$$P(10mA) = 9,94\Omega \cdot (0,01A)^2 = 0,994mW$$

2 Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern

2.1 Messwerte

Die Bedingungen entscheiden sich nur dahingehend von der ersten Aufgabe, dass die Spule nun einen geschlossenen Eisenkern bekommt und die Stromstärken verändert werden. Die Messung und Berechnung der Werte verläuft nach dem gleichen Schema wie in Aufgabe 1. Die Spannung U_L wurde mittels eines Vorwiderstands von $9,6M\Omega$, den wir in Reihe schalteten, und dem Innenwiderstand des Oszillosgraphen ($1M\Omega$) gemessen, da sonst die Spitzenwerte nicht mehr auf dem Bildschirm angezeigt werden konnten. Wir mussten den angezeigten Wert der Spannung also mit $\frac{9,6+1}{1} = 10,6$ multiplizieren.

Größe	Messung 1	Messung 2	Herkunft
I (in mA)	10	30	eingestellt
R (in Ω)	10	10	gegeben
f (in Hz)	50	50	gegeben
U_R (in V)	0,2887	0,812	gemessen
U_L (in V)	24,67	171,2	gemessen
Δt (in ms)	4,41	3,98	gemessen
φ (in Rad)	1,3854	1,2504	errechnet
φ (in $^\circ$)	75,38	71,642	errechnet
$ Z $ (in Ω)	854,52	2108,37	errechnet
R_I (in Ω)	157,52	664,02	errechnet
L (in H)	2,67	6,37	errechnet

2.2 Interpretation der Messwerte

Diese Messreihe ergibt ein im Vergleich zur Aufgabe 1 deutlich verändertes Bild. Offensichtlich hängen Induktivität und Verlustwiderstand nun sehr stark von der Stromstärke ab. Außerdem wurde die Phasenverschiebung im Vergleich etwas größer. Am meisten fällt jedoch ins Auge, dass sich die Induktivität der Spule um ein Vielfaches vergrößert hat. Bei den gleichen Werten $I = 30mA$ stieg diese um das 187-fache, das ist ein enormer Anstieg!

2.3 Bestimmung der relativen Permeabilität

Nun wollen wir die relative Permeabilität μ bestimmen. Diese ist jedoch nicht konstant, da sie von B und somit also vom Induktionsstrom abhängt. Bei der Rechnung muss man beachten, dass sich die Geometrie des Problems verändert hat - das magnetische Feld verläuft nun fast ausschließlich im Inneren des Eisenkerns. Das verändert zwar nichts an der Form der Gleichung für L , es ändert sich jedoch eine Variable: Nicht die Länge der Spule, sondern die mittlere Länge der magnetischen Feldlinien ist nun ausschlaggebend ($l_{Feld} = 0,48m$). Die Querschnittsfläche ist nun natürlich auch auf den Eisenkern bezogen und beträgt $A_{Kern} = 0,039m \cdot 0,039m$ - damit entfällt der nur für die Spule relevante Korrekturfaktor k . Die neue Formel für die Induktivität lautet nun

$$L = n^2 \cdot \mu \mu_0 \cdot \frac{A_{Kern}}{l_{Feld}} \rightarrow \mu = \frac{L \cdot l_{Feld}}{A_{Kern} \cdot \mu_0 \cdot n^2}$$

Für unsere Messungen ergeben sich damit folgende Werte:

Größe	Messung 1 (10mA)	Messung 2 (30mA)
Induktivität L (in H)	2,67	6,37
μ	670,52	1599,7

Aus der Rechnung geht hervor, dass μ nicht konstant ist. Das haben wir jedoch erwartet, da es wie schon gesagt von der Stromstärke abhängt.

3 Ferromagnetische Hysterese

Die Kästchen auf den Schaubildern sind haben eine Länge von $2,6cm$ in x-Richtung und eine Höhe von $1,9cm$ in y-Richtung. Für die Rechnungen wurden also die Skalierungen der Kästchen durch diese Werte geteilt. Der Anschaulichkeit halber wurden die Schaubilder jedoch nach Kästchen und nicht nach cm beschriftet.

3.1 Formeln und Größen

Folgende Daten sind bekannt:

Feldlinienlänge Eisenkern	$l_{Kern} = 0,48m$
Querschnittsfläche Eisenkern	$A_{Kern} = 0,001521m^2$
Widerstand Stromkreis 1	$R = 10\Omega$
Spule 1	$n_1 = 1000$ Windungen
Spule 2	$n_2 = 50$ Windungen
Widerstand R-C-Glied	$R_C = 100k\Omega$
Kondensator R-C-Glied	$C = 1\mu F$

Um die Hysteresekurve zu messen, bauten wir eine Schaltung gemäß der Vorbereitung auf. Die Spannungsquelle wurde mit dem ersten Stromkreis verbunden. In diesem befand sich ein Ampèremeter, der Widerstand R und die erste Spule mit n_1 , welche alle in Reihe geschaltet wurden. Über den Eisenkern wurde die zweite Spule mit n_2 und mit ihr der zweite Stromkreis, welcher aus einem R-C-Glied bestand, angekoppelt.

Folgende Beziehungen zwischen H und U_R sowie B und U_C benötigen wir für unsere Berechnung:

$$H = \frac{n_1}{l_{Kern} \cdot R} \cdot U_R \quad (1)$$

$$B = \frac{C \cdot R_1}{n_2 \cdot A_{Kern}} \cdot U_C \quad (2)$$

Die Faktoren vor den Spannungen sind die Eichfaktoren, die wir für die Skalierung benötigen. H legen wir auf die x-Achse, B auf die y-Achse unseres Graphen.

Im Versuch druckten wir die Hysteresekurven, schnitten sie aus und versuchten über deren Gewicht das Integral $\int B \cdot dH$ zu bestimmen. Die Papierdicke betrug $\frac{70g}{cm^2}$ - darüber konnten wir die Fläche der Papierstücke mit der Formel $A = \frac{m}{\rho}$ berechnen. Multipliziert mit den beiden Eichkonstanten und der Zahleneinteilung des Oszilloskops ergibt sich das Integral $\int B \cdot dH$, welches die Ummagnetisierungsarbeit pro Volumen $\frac{W}{V}$ angibt.

Die Formel, um die Ummagnetisierungsarbeit pro Volumen zu berechnen lautet folglich

$$\frac{W}{V} = \frac{m}{\rho} \cdot \text{Eichfaktoren} \cdot \text{Skalierung} \quad (3)$$

Die Verlustleistung ergibt sich durch Erweitern mit $\frac{V}{T}$:

$$P = \frac{W}{T} = \frac{W}{V} \cdot \frac{V}{T} = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

Hierbei ist die Periodendauer $T = \frac{1}{f} = 0,02s$, da $f = 50Hz$. Das Volumen des Eisenkerns betrug $V = A_{Kern} \cdot l_{Kern}$, also lautet die (mit unseren Messwerten anwendbare) Formel

$$P = \frac{W}{V} \cdot A_{Kern} \cdot l_{Kern} \cdot f \quad (4)$$

Hat man einmal die Verlustleistung, lässt sich auch der Verlustwiderstand ganz einfach berechnen:

$$R_{Mag} = \frac{U_{eff}}{I_{eff}} = \frac{P}{I_{eff}^2} \quad (5)$$

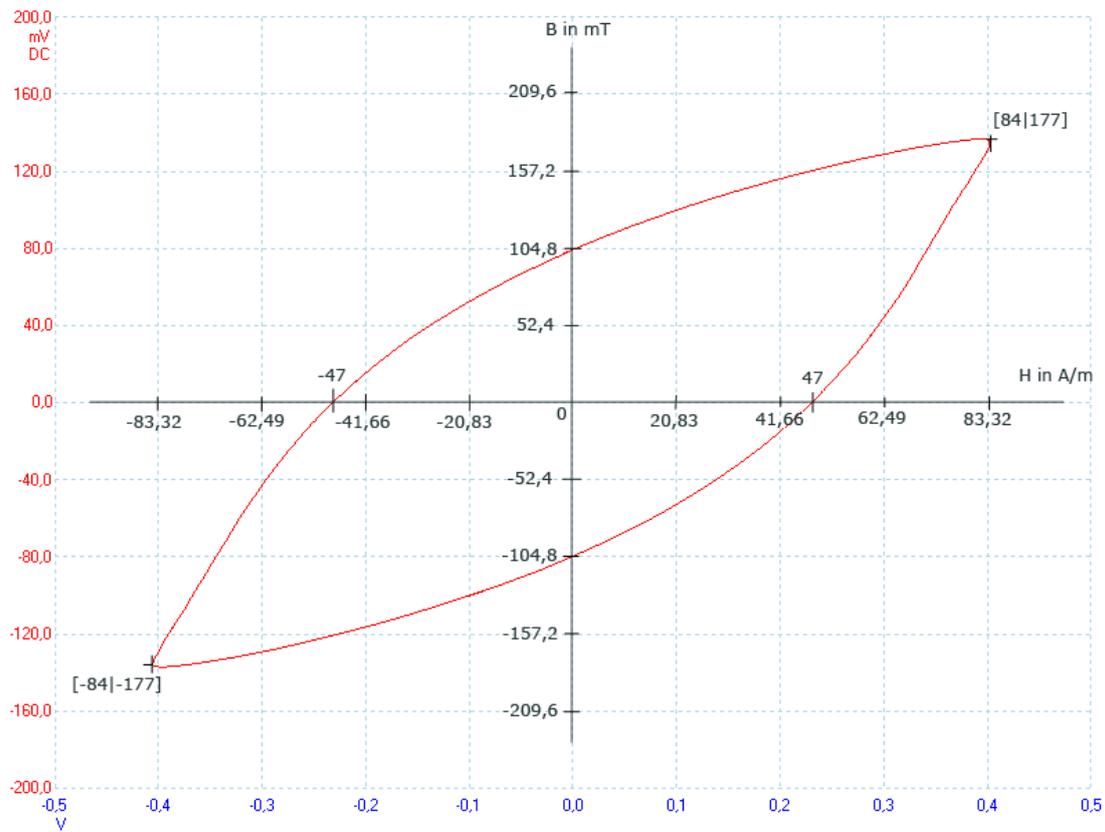
Durch ablesen von (B,H) -Wertepaaren aus der Hystereseschleife lässt sich die relative Permeabilitätszahl μ_r bestimmen:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (6)$$

3.2 Messwerte für $I_{eff} = 30mA$

Größe	Wert	Herkunft
Strom I	0,03A	eingestellt
Skalierung x-Achse	0,1V/Kästchen	abgelesen
Skalierung y-Achse	0,04V/Kästchen	abgelesen
Gewicht m (Integral)	0,8773g	gemessen
Eichfaktor x-Achse	208,3 A/Vm	errechnet nach (1)
Eichfaktor y-Achse	1,31 s/m ²	errechnet nach (2)
Ummagnetisierungsarbeit W/V	69,23 J/m ³	errechnet nach (3)
Verlustleistung P	2,53W	errechnet nach (4)
Verlustwiderstand R_{Mag}	2807,9Ω	errechnet nach (5)
1. Markierung auf der x-Achse	20,83 A/m	errechnet aus Eichfaktor · Skalierung
1. Markierung auf der y-Achse	0,0524 Vs/m ²	errechnet aus Eichfaktor · Skalierung

Mit diesen Angaben können wir nun eine passende Skala für $[H|B]$ in das Bild, das unser Oszilloskop geliefert hat, eintragen.

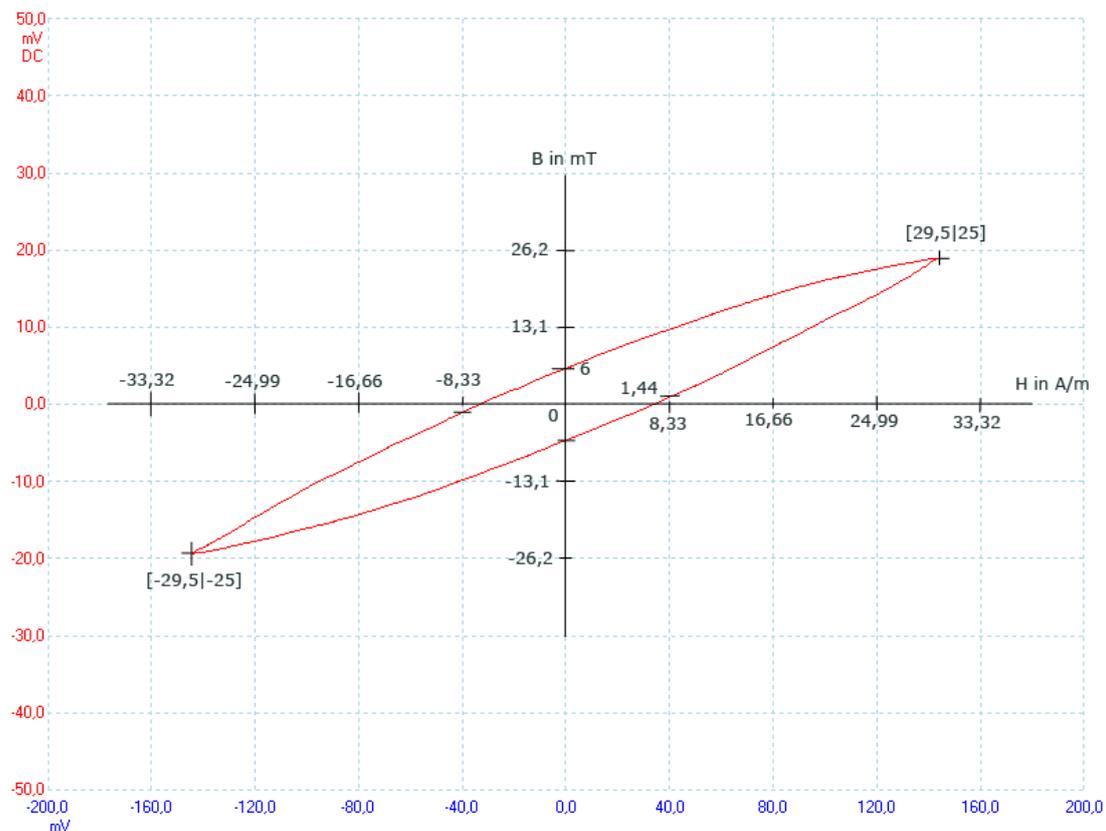


Um μ_r zu berechnen muss nun aus diesem Schaubild lediglich ein $[H|B]$ Wertepaar abgelesen und in die Gleichung (6) eingesetzt werden. Bei $[84|177]$ würde μ_r also 1676,8 betragen.

3.3 Messwerte für $I_{eff} = 10mA$

Größe	Wert	Herkunft
Strom I	0,01A	eingestellt
Skalierung x-Achse	40mV/Kästchen	abgelesen
Skalierung y-Achse	10mV/Kästchen	abgelesen
Gewicht m (Integral)	0,1745g	gemessen
Eichfaktor x-Achse	208,3 A/Vm	errechnet nach (1)
Eichfaktor y-Achse	1,31 s/m ²	errechnet nach (2)
Ummagnetisierungsarbeit W/V	1,38 J/m ³	errechnet nach (3)
Verlustleistung P	0,05W	errechnet nach (4)
Verlustwiderstand R_{Mag}	502,7Ω	errechnet nach (5)
1. Markierung auf der x-Achse	8,332 A/m	errechnet aus Eichfaktor · Skalierung
1. Markierung auf der y-Achse	0,0131 Vs/m ²	errechnet aus Eichfaktor · Skalierung

Wir tragen nun wieder wie in 3.2 mit Hilfe dieser Daten eine geeignete Skala in das Bild des Oszilloskops ein.



Auch μ_r wird analog zu 3.2 berechnet. Am Punkt [29, 5|25] ist $\mu_r = 674, 37$.

3.4 Vergleich mit Aufgabe 2

Wert	Aufgabe 2 (30mA)	Aufgabe 3 (30mA)	Aufgabe 2 (10mA)	Aufgabe 3 (10mA)
R_I	664, 02Ω	-	157, 52Ω	-
μ_r	1599, 7	1676, 8	670, 52	674, 37
P_{Draht}	9mW	-	0, 994mW	-
$P_{Ummagn.}$	-	2, 53W	-	0, 05W
P_{Gesamt}	597, 62mW	-	15, 75mW	-

Es lässt sich feststellen, dass die Werte für μ_r sehr gut übereinstimmen, bei 10mA sind sie sogar nahezu identisch. Auch die Abweichung bei 30mA beträgt weniger als 5%. Solch geringe Abweichungen waren eigentlich nicht zu erwarten, wenn man die bereits erwähnten Fehlerquellen und die starke Fehlerfortpflanzung in dieser Versuchsreihe betrachtet - es muss sich entweder um einen glücklichen Zufall, oder aber um sehr genaue Messungen handeln! Dennoch sind die Messfehler leider so groß, dass die Summe aus der

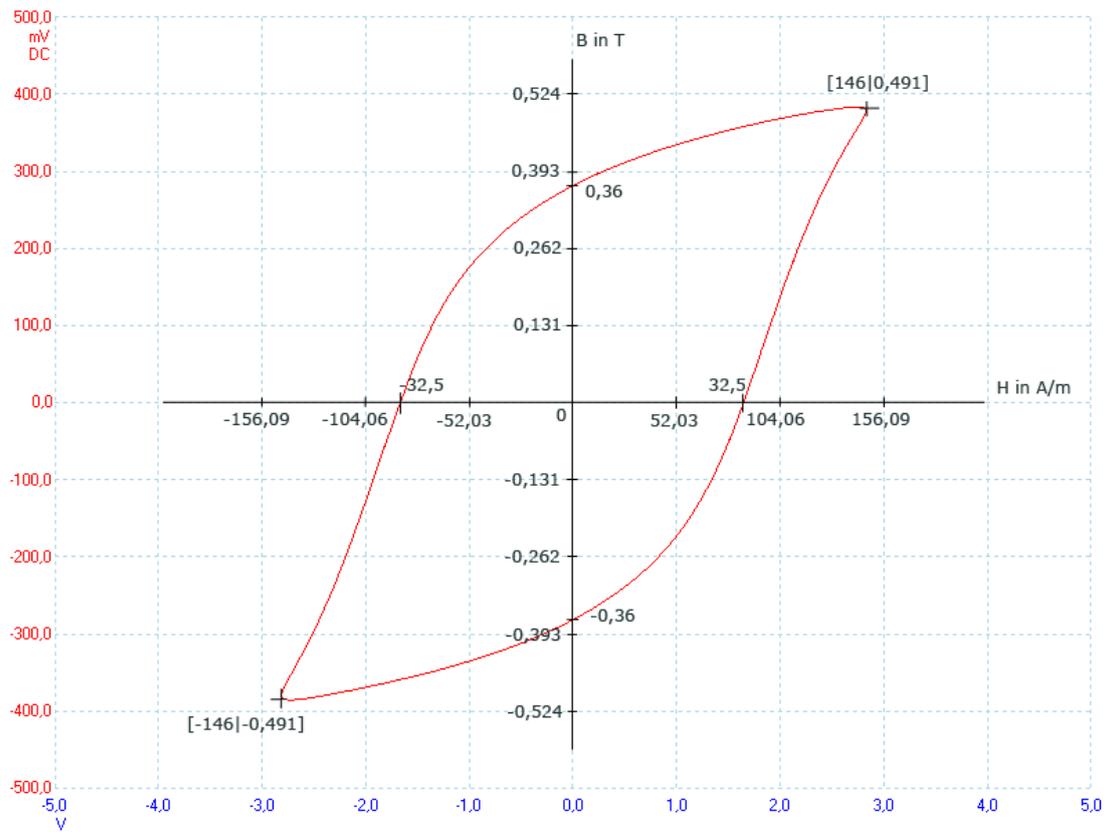
Draht-Verlustleistung P_{Draht} und der Ummagnetisierungs-Verlustleistung $P_{\text{Ummagn.}}$ in beiden Fällen die errechnete Gesamt-Verlustleistung P_{Gesamt} um einen beachtlichen Betrag übersteigen.

4 Vergleich Eisen - Ferrit

4.1 Messwerte für Eisen

Die Messung erfolgt analog zu Aufgabe 3, es wurden lediglich die Windungszahl der Spule ($n_1 = 250$) und der Strom ($I = 0,2A$) verändert.

Größe	Wert	Herkunft
Strom I	0,2A	eingestellt
Skalierung x-Achse	1V/Kästchen	abgelesen
Skalierung y-Achse	0,1V/Kästchen	abgelesen
Gewicht m (Integral)	0,7875g	gemessen
Eichfaktor x-Achse	52,03 A/Vm	errechnet nach (1)
Eichfaktor y-Achse	1,31 s/m ²	errechnet nach (2)
Ummagnetisierungsarbeit W/V	155,3 J/m ³	errechnet nach (3)
Verlustleistung P	5,67W	errechnet nach (4)
Verlustwiderstand R_{Mag}	141,554Ω	errechnet nach (5)
1. Markierung auf der x-Achse	52,03 A/m	errechnet aus Eichfaktor · Skalierung
1. Markierung auf der y-Achse	0,131 Vs/m ²	errechnet aus Eichfaktor · Skalierung



Außerdem wird in der Aufgabenstellung hier nach der Remanenz, Koerzitivkraft und Sättigungsinduktion gefragt. Diese drei Größen lassen sich einfach aus der Hystereseschleife ablesen.

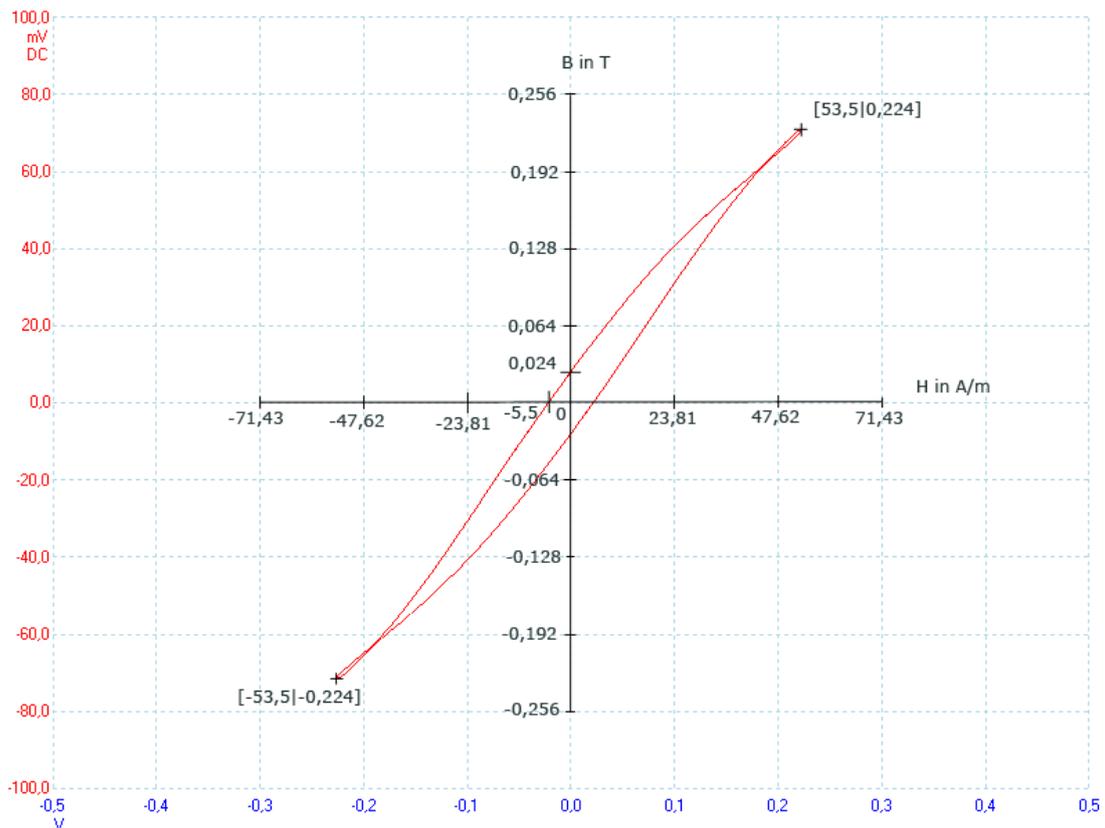
- Die Remanenz ist der y-Wert der Hystereseurve bei $x = 0$. Bei uns liegt sie also etwa bei $0,36T$
- Die Koerzitivkraft ist der x-Wert der Hystereseurve bei $y = 0$. Dieser ist bei uns etwa $32,5\frac{A}{m}$
- Die Sättigungsinduktion ist der y-Wert am Hochpunkt der Kurve. Sie beträgt hier etwa $0,491T$

4.2 Messwerte für Ferrit

Die zweite Spule wurde nun durch eine mit Ferritkern ersetzt. Diese unterscheidet sich von der vorherigen in ihrer mittleren Feldlinienlänge (nun $l_{Kern} = 0,105m$) und der Querschnittsfläche (nun $A_{Kern} = 0,000625m^2$). Die Rechnung verläuft analog zu den vorherigen.

Größe	Wert	Herkunft
Strom I	0,015A	eingestellt
Skalierung x-Achse	0,1V/Kästchen	abgelesen
Skalierung y-Achse	0,02V/Kästchen	abgelesen
Gewicht m (Integral)	0,0688g	gemessen
Eichfaktor x-Achse	238,1 A/Vm	errechnet nach (1)
Eichfaktor y-Achse	3,2 s/m ²	errechnet nach (2)
Ummagnetisierungsarbeit W/V	0,303 J/m ³	errechnet nach (3)
Verlustleistung P	1,988mW	errechnet nach (4)
Verlustwiderstand R_{Mag}	8,83Ω	errechnet nach (5)
1. Markierung auf der x-Achse	23,81 A/m	errechnet aus Eichfaktor · Skalierung
1. Markierung auf der y-Achse	0,064 Vs/m ²	errechnet aus Eichfaktor · Skalierung

Aus diesen Werten erstellen wir wieder eine Skala, die auf die Hysteresekurve aufgetragen wird.



Wieder sind Remanenz, Koerzitivkraft und Sättigungsinduktion gefragt. Die Vorgehensweise ist identisch mit der obigen.

- Die Remanenz beträgt etwa 0,024T

- Die Koerzitivkraft beträgt etwa $5,5 \frac{A}{m}$
- Die Sättigungsinduktion beträgt etwa $0,224T$

4.3 Vergleich Eisen - Ferrit

Man sieht sofort, dass der Ferritkern eine wesentlich schmalere Hysterseurve als der Eisenkern hat. Das bedeutet, dass Ferrit sich viel leichter mag- und entmagnetisieren lässt als Eisen, es ist "weichmagnetisch".

Größe	Eisen	Ferrit
Ummagnetisierungsarbeit W/V	$155,3 J/m^3$	$0,303 J/m^3$
Verlustleistung P	$5,67W$	$1,988mW$
Verlustwiderstand R_{Mag}	$141,554\Omega$	$8,83 \Omega$
Remanenz	$0,36T$	$0,024T$
Koerzitivkraft	$32,5 A/m$	$5,5 A/m$
Sättigungsinduktion	$0,491T$	$0,224T$

Ummagnetisierungsarbeit, Remanenz und Koerzitivkraft sind bei Ferrit wesentlich kleiner als bei Eisen. Deshalb ist Ferrit ein gutes Material, um z.B. hochwertige Spulen herzustellen. Andererseits kann man die relative hohe benötigte Ummagnetisierungsarbeit bei Eisen ausnutzen, um z.B. Permanentmagnete herzustellen.