

Versuch P1-83,84 – Ferromagnetische Hysterese

Auswertung

Von Ingo Medebach und Jan Oertlin

4. Januar 2010

Inhaltsverzeichnis

1. Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule.....	2
1.1. Induktivität und Verlustwiderstand aus einer Messungen.....	2
1.2. Induktivität und Verlustleistung aus den Spulendaten.....	3
2. Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern.....	3
2.1. Induktivität und Verlustwiderstand aus einer Messungen.....	3
2.2. Permeabilitätswerte aus Spulen- und Eisenkerndaten sowie den Messungen.....	4
3. Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste.....	5
3.1. Magnetisierungskurve eines Eisenkerns.....	5
3.2. Eichen der Achsen.....	5
3.3. Das Integral $\int B dH$	5
3.4. Bestimmung der Wechselfeld - Permeabilität.....	6
3.5. Vergleich.....	6
4. Sättigungsinduktion, Remanenz, Koerzitivkraft, magnetische Härte, Vergleich von Eisen und Ferrit.....	7

1. Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule

1.1. Induktivität und Verlustwiderstand aus einer Messungen

Hier haben wir eine Spule mit 1000 Windungen benutzt und einen 10Ω Widerstand in Reihe geschaltet. Bei Wechselströmen von 300 mA und 30 mA mit jeweils einer Frequenz von 50 Hz haben wir die Spannungsamplitude an der Spule sowie an dem Widerstand als auch die Phasenverschiebung gemessen.

I_{eff} in mA	300	30
U_{Spule} in V_{SS}	15,43	1,377
$U_{\text{widerstand}}$ in V_{SS}	10,76	0,961
Δt in s	0,00262	0,00262

Mit unseren Messdaten berechnen wir nun die Spuleninduktivität L sowie den Verlustwiderstand r . Wir benutzen dazu:

$$L = |Z| \frac{1}{2\pi f} \sin \Delta \Phi$$

und

$$r = |Z| \cos \Delta \Phi .$$

$|Z|$ erhalten wir über

$$|Z| = \frac{\hat{U}_L}{\hat{I}} = \frac{\hat{U}_L \cdot R}{\hat{U}_R}$$

und die Phasenverschiebung über

$$\Delta \Phi = \Delta t \cdot 2\pi \cdot f .$$

Ebenso berechnen wir die Verlustleistung mit der Formel $P = U \cdot I = r \cdot I_{\text{eff}}^2$.

Es ergeben sich dann folgend Werte:

I_{eff} in mA	300	30
Z in Ω	14,34	14,33
$\Delta \Phi$ in rad	0,823	0,823
r in Ω	9,75	9,74
L in mH	33,47	33,44
P_{mag} in W	0,88	0,01

1.2. Induktivität und Verlustleistung aus den Spulendaten

Hier berechnen wir die Spuleninduktivität und den Verlustwiderstand aus den angegebenen Daten zur Spule.

Die Induktivität ist gegeben durch:

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

Da die Spule nicht sehr lang ist, muss L noch mit dem Korrekturfaktor $k \approx 0,55$ multipliziert werden.

Es ergibt sich für L :

$$L \approx 36,9 \text{ mH}$$

Der Verlustwiderstand ist gegeben durch:

$$r = \rho_{\text{Cu}} \frac{s}{A_{\text{Draht}}}$$

Es ergibt sich für r mit $\rho_{\text{Cu}} = 16,78 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ m}$ und s der Länge des Drahtes¹:

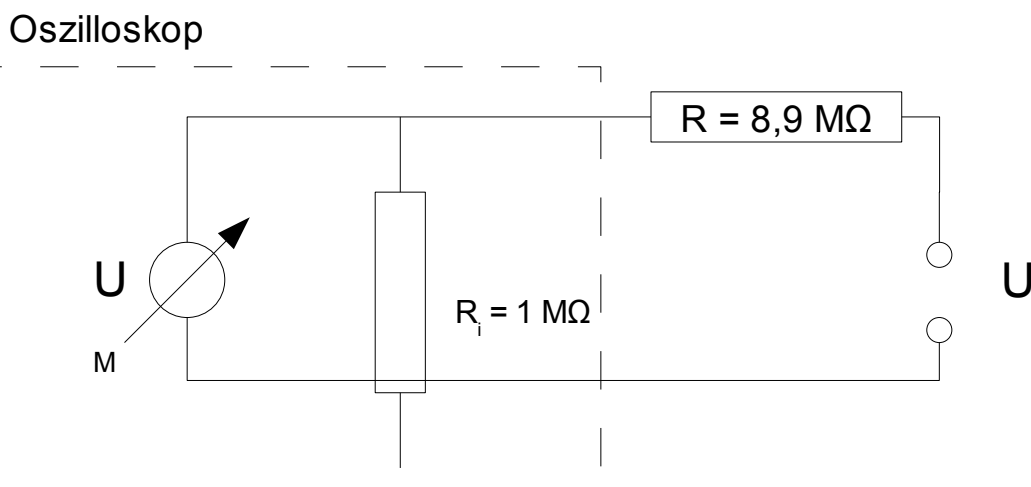
$$r \approx 9,31 \Omega$$

Unsere gemessenen Werte sind sehr nahe an den theoretischen. Die kleinen Ungenauigkeiten könnten durch Ablesefehler sowie durch die Widerstände der benutzten Kabel entstanden sein.

2. Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern

2.1. Induktivität und Verlustwiderstand aus einer Messungen

Hier bestimmen wir jetzt die Induktivität und den Verlustwiderstand einer Spule mit geschlossenem Eisenkern. Wir benutzen die gleichen Formeln wie in **Aufgabe 1.1**. Wir haben bei den Messungen bei $I_{\text{eff}} = 30 \text{ mA}$ einen Tastschalter wie beim Versuch **Vierpole und Leitungen** benutzt. Das Schaubild dazu sieht folgendermaßen aus:



¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Spezifischer_Widerstand#Einteilung_von_Materialien, Tabelle, 16.12.2009, 15:29 Uhr

Wir erhalten also:

$$U_M = R_i \cdot I$$

$$\Rightarrow U = (R_i + R) I = \frac{(R_i + R)}{R_i} \cdot U_M$$

Wir mussten deswegen unseren gemessenen Wert von $U_M = 9,54 \text{ V}_{ss}$ noch mit den Faktor 9,9 multiplizieren und erhalten den echten Wert von $U = 94,446 \text{ V}_{ss}$.

Es ergeben sich nun folgende gemessene Werte:

I_{eff} in mA	10	30
U_{Spule} in V_{ss}	16,100	94,400
$U_{\text{Widerstand}}$ in V_{ss}	0,395	1,210
Δt in ms	3,980	2,540

Wir berechnen nun mit den Messdaten $|Z|$ über

$$|Z| = \frac{\hat{U}_L \cdot R}{\hat{U}_R}$$

sowie die Phasenverschiebung $\Delta\Phi$ mit

$$\Delta\Phi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t,$$

den Verlustwiderstand r mit

$$r = |Z| \cos \Delta\Phi$$

und die Induktivität L , die gegeben ist durch:

$$L = |Z| \frac{1}{2\pi f} \sin \Delta\Phi$$

Wir erhalten dann folgende Werte:

I_{eff} in mA	10	30
U_{Spule} in V_{ss}	16,100	94,400
$U_{\text{Widerstand}}$ in V_{ss}	0,395	1,210
Δt in ms	3,980	2,540
Z in Ω	406,820	783,130
$\Delta\Phi$ in rad	1,250	0,798
r in Ω	128,14	546,76
L in H	1,23	1,78

2.2. Permeabilitätswerte aus Spulen- und Eisenkerndaten sowie den Messungen

Hier berechnen wir aus unseren Messdaten sowie aus den Daten der Spule und des Eisenkerns die

relativen Wechselfeld-Permeabilitätswerte μ_r . Ebenso berechnen wir die Gesamtverlustleistung P .
Wir benutzen dazu:

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

und

$$P = U \cdot I = r \cdot I_{\text{eff}}^2.$$

l ist die Länge, A der Querschnitt.

Es ergeben sich folgende Werte:

I_{eff} in mA	10	30
μ_r	308,7	448,2
P in mW	12,8	492,1

3. Ferromagnetische Hysteresis und Ummagnetisierungsverluste

3.1. Magnetisierungskurve eines Eisenkerns

3.2. Eichfaktoren der Achsen

Hier haben wir nun mit dem Oszilloskop Hysteresiskurven aufgenommen und werten sie aus. Dazu benötigen wir Eichfaktoren, da wir nicht direkt H und B messen. Außerdem benötigen wir geometrische Faktoren, da wir die Kurve ausgedruckt haben und wir von cm auf V umrechnen müssen.

Für die Eichfaktoren gilt:

$$H = n \frac{I}{l} = \frac{n}{l \cdot R} U_R = \gamma_H \cdot U_R$$

sowie

$$B = \frac{R_{\text{Tiefpass}} C}{n_2 A_2} U_C = \gamma_B \cdot U_C.$$

Wir erhalten:

$$\gamma_H = \frac{1000}{0,48\text{m} \cdot 10 \cdot \Omega} \approx 208,34 \frac{\text{A}}{\text{Vm}}$$

sowie

$$\gamma_{B1} = \frac{R_{\text{Tiefpass}} C}{n_2 A_2} = \frac{100\text{k}\Omega \cdot 10\mu\text{F}}{50 \cdot (3,9\text{cm})^2} = 13,15 \frac{\text{T}}{\text{V}}$$

bei einem Widerstand am Tiefpass von 100 k Ω .

$$\gamma_{B2} = 1,315 \frac{\text{T}}{\text{V}}$$

erhalten wir bei einem Widerstand am Tiefpass von 10 k Ω .

3.3. Das Integral $\oint B dH$

Jetzt lösen wir das Flächenintegral $\oint B dH$, indem wir die ausgedruckten und ausgeschnittenen Kurven wiegen. Dazu brauchen wir mehrere Eichfaktoren:

Unsere geometrischen Eichfaktoren nennen wir a_x und a_y .

Die Eichfaktoren γ_H und γ_B übernehmen wir von **Aufgabe 3.2.**, wobei wir γ_B je nach verwendeten Widerstand beim Tiefpass anpassen müssen.

Unser Papier hat eine Dichte von $\rho = 80\text{g/m}^2$ und für das effektive Eisenvolumen verwenden wir $V = 730\text{cm}^3$.

Um das Integral zu bestimmen benutzen wir

$$\oint B dH = \frac{W_{\text{mag}}}{V} = \gamma_H \cdot \gamma_B \cdot a_x \cdot a_y \frac{m}{\rho_{\text{Papier}}}$$

Die Verlustleistung P_{mag} bestimmten wir über

$$P_{\text{mag}} = \frac{W}{V} \cdot V \cdot f$$

und den Verlustwiderstand mit:

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

Wir erhalten somit:

I_{eff} in mA	10	30
R_{Tiefpass} in kΩ	10	100
m in g	0,1428	0,4264
a_x in V/m	1,48	3,7
a_y in V/m	0,588	0,588
γ_H in A/(Vm)	208,34	208,34
γ_B in T/V	1,315	13,15
W_{mag} / V in J/m³	0,43	31,81
P_{mag} in W	0,0156	1,161
r_{mag} in kΩ	0,1556	1290

3.4. Bestimmung der Wechselfeld – Permeabilität

Hier sollten wir mit Wertepaare μ_r bestimmen, dazu nehmen wir die Sättigungspunkte.

I_{eff} in mA	10	30
B in T	0,0155	0,18
H in A/m	28,4	96,45
μ_r	433,56	1467,87

3.5. Vergleich

	$\mu_{\text{Aufgabe 2}}$	$\mu_{\text{Aufgabe 3}}$
$I_{\text{eff}} = 10 \text{ mA}$	308,7	433,56
$I_{\text{eff}} = 30 \text{ mA}$	448,2	1467,87

Bei 10 mA kann man noch eine gewissen Nähe der beiden Werte erkennen. Aber bei 30 mA ist die Differenz sehr groß.

Um die Verlustleistung miteinander zu vergleichen, benutzen wir folgende Formel:

$$P = |Z| I_{\text{eff}}^2$$

	P_{ges}	P_{mag}	P_{Draht}
$I_{\text{eff}} = 10 \text{ mA}$	40,68 mW	15,6 mW	1,4 mW
$I_{\text{eff}} = 30 \text{ mA}$	704,8 mW	1161 mW	12,9 mW

Bei 10 mA ist schön zu erkennen, dass die Gesamtverlustleistung größer ist als die Summe der magnetischen Verlustleistung und der Verlustleistung des Drahtes. Bei 30 mA ist dies leider nicht so, hier muss uns ein Fehler unterlaufen sein.

4. Sättigungsinduktion, Remanenz, Koerzitivkraft, magnetische Härte, Vergleich von Eisen und Ferrit

Hier vergleichen wir die Sättigungsinduktion, die Remanenz, die Koerzitivkraft und die magnetische Härte von Eisen und Ferrit. Dazu gehen wir wie auch in **Aufgabe 3.** vor und erhalten folgende Werte.

	Eisen	Ferrit
m in g	0,819	0,079
a_x in V/m	37,040	3,704
a_y in V/m	5,880	0,588
γ_H in A/(Vm)	1,3150	3,200
γ_B in T/V	52,080	238,100
W_{mag} / V in J/m ³	152,68	1,647
P_{mag} in W	5,573	0,005
r_{mag} in k Ω	139,337	24,057
Sättigungsinduktion in T	0,466	0,137
Remanenz in T	0,338	0,014
Koerzitivkraft in A/m	-62,079	-5,238

Wie man sehen kann, ist die Sättigungsinduktion bei Ferrit ungefähr sieben Mal größer als beim Eisenkern. Außerdem ist die Ummagnetisierungsarbeit bei Ferrit ungefähr 90 Mal kleiner als die bei Eisen. Deshalb ist dieser Ferritkern mehr für Transformatoren geeignet als der verwendete Eisenkern.