

Praktikum Klassische Physik I

Versuchsvorbereitung: P1-83, 84: Ferromagnetische Hysterese

Christian Buntin
Gruppe Mo-11

Karlsruhe, 23. November 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule	2
1.1	Messung	2
1.2	Berechnung aus den Spulendaten	2
2	Induktivität und Verlustleistung einer Spule mit geschlossenem Eisenkern	3
2.1	Messung	3
2.2	Berechnung der Permeabilität und der Gesamtverlustleistung	3
3	Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste	4
3.1	Oszilloskopische Darstellung	4
3.2	Eichung der Achsen	4
3.3	Bestimmung des Flächenintegrals	5
3.4	Permeabilität	5
3.5	Vergleich	5
4	Vergleich Eisen–Ferrit	5

1 Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule

Es sollen die Induktivität und die Verlustwiderstand einer Luftspule gemessen werden.

Für die *Impedanz* Z und den *Scheinwiderstand* $|Z|$ der Spule gilt:

$$Z = R_S + i\omega L \quad |Z| = \sqrt{R_S^2 + \omega^2 L^2} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}}$$

1.1 Messung

Um \hat{I} zu messen, wird der Spannungsabfall an einem bekannten, in Reihe geschalteten Widerstand $R = 10 \Omega$ gemessen:

$$R = \frac{\hat{U}_R}{\hat{I}} \Leftrightarrow \hat{I} = \frac{\hat{U}_R}{R}$$

Somit ist

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

und

$$|Z|^2 = R_S^2 + \omega^2 L^2 = \frac{\hat{U}^2}{\hat{U}_R^2} R^2$$

Durch Messung der *Phasenverschiebung* φ , aus der Zeitdifferenz Δt

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\varphi}{2\pi} \Leftrightarrow \varphi = \frac{2\pi\Delta t}{T} = 2\pi f\Delta t = \omega\Delta t$$

lässt sich über die Beziehung

$$\tan \varphi = \frac{\operatorname{Im} Z}{\operatorname{Re} Z} = \frac{\omega L}{R_S}$$

den *Verlustwiderstand* R_S und die *Induktivität* L der Spule berechnen:

$$R_S^2 (1 + \tan^2 \varphi) = \frac{\hat{U}^2}{\hat{U}_R^2} R^2 \Leftrightarrow R_S = \frac{\hat{U}}{\hat{U}_R} R \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} = \frac{\hat{U}}{\hat{U}_R} R \cos \varphi$$
$$\omega^2 L^2 \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \varphi}\right) = \frac{\hat{U}^2}{\hat{U}_R^2} R^2 \Leftrightarrow L = \frac{\hat{U}}{\hat{U}_R} \frac{1}{\omega} \frac{\tan \varphi}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} = \frac{\hat{U}}{\hat{U}_R} \frac{1}{\omega} \sin \varphi$$

1.2 Berechnung aus den Spulendaten

Für die Induktivität einer lang gestreckten und luftgefüllten Spule der Länge L mit n Windungen und mittlerer Querschnittsfläche \bar{A} gilt:

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

Bei einer kurzen Spule muss der Wert noch mit einem geometrieabhängigen Faktor k multipliziert werden.

Hier:

$$n = 1000 \quad l = 6,8 \text{ cm} \quad \bar{A} = \pi 3,4^2 \text{ cm}^2 \quad k = 0,55$$

$$L = kn^2 \mu_0 \frac{\bar{A}}{l} = 0,55 \cdot 1000^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{\pi \cdot 3,4^2 \text{ cm}^2}{6,8 \text{ cm}} = 36,91 \text{ mH}$$

Für den Leitungswiderstand einer Kupferspule mit mittlerem Wickelradius \bar{r} und Drahtquerschnitt A gilt:

$$R = \rho_{\text{Cu}} \frac{l}{A} = \rho_{\text{Cu}} \frac{4 \cdot \bar{r} \cdot n}{A}$$

Hier:

$$\rho_{\text{Cu}} = 1,678 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \bar{r} = 3,4 \text{ cm} \quad n = 1000 \quad A = \pi \left(\frac{0,7 \text{ mm}}{2} \right)^2$$

$$R = 1,678 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \frac{4 \cdot 3,4 \text{ cm} \cdot 1000}{\pi \left(\frac{0,7 \text{ mm}}{2} \right)^2} = 5,93 \Omega$$

2 Induktivität und Verlustleistung einer Spule mit geschlossenem Eisenkern

Die Spule wird jetzt mit einem geschlossenen Eisenkern gefüllt.

2.1 Messung

Es wird wie in Aufgabe 1.1 gemessen und der Verlustwiderstand R_S und die Induktivität L der Spule bestimmt.

2.2 Berechnung der Permeabilität und der Gesamtverlustleistung

Für die Induktivität einer Spule, bei welcher das gesamte Magnetfeld innerhalb eines geschlossenen Jochs der Querschnittsfläche A und mittlerer Feldlinienlänge l befindet, gilt (die Länge spielt keine Rolle mehr):

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

Somit gilt für die magnetische Permeabilität μ_r des Jochs:

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

Für die *Gesamtverlustleistung* gilt;

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \text{Re} U(t) \cdot \text{Re} I(t) dt = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R_S} = \frac{1}{2} \frac{\hat{U}^2}{R_S}$$

3 Ferromagnetische Hysteresis und Ummagnetisierungsverluste

3.1 Oszilloskopische Darstellung

Die Magnetisierungskurve (*Hysteresis*) soll oszilloskopisch dargestellt werden. Dazu wird B über H aufgetragen.

Da für die magnetische Feldstärke H gilt:

$$H = n_1 \frac{I}{l} = n_1 \frac{U_R}{Rl}$$

wird der Spannungsabfall U_R an einem in Reihe geschalteten Widerstand R als Maß für H genommen.

Für die magnetische Feldstärke B gilt bei Induktion an einer Spule mit n_2 Windungen und Querschnittsfläche A :

$$U_{\text{ind}} = -n_2 A \dot{B} \Rightarrow \dot{B} = -\frac{U_{\text{ind}}}{n_2 A} \Rightarrow B = \frac{1}{n_2 A} \int U_{\text{ind}} dt$$

Daher wird als Maß für B das Integral über die induzierte Spannung U_{ind} verwendet. Dieses wird mittels eines RC-Gliedes erzeugt:

$$\begin{aligned} U_C &= \frac{1}{C} Q = \frac{1}{C} \int I dt = \frac{1}{R_1 C} \int (U_{\text{ind}} - U_C) dt \approx \frac{1}{R_1 C} \int U_{\text{ind}} dt \text{ für } U_C \ll U_{\text{ind}} \\ &\Rightarrow \int U_{\text{ind}} = U_C R_1 C \Rightarrow B = \frac{U_C R_1 C}{n_2 A} \end{aligned}$$

Somit muss für die Vertikalablenkung die Spannung U_C am Kondensator des Integrierers gewählt werden.

Dabei muss das RC-Glied so gewählt werden, dass $R_1 \gg \frac{1}{\omega C}$ ist und R_1 und C genügend groß sind.

3.2 Eichung der Achsen

Für die H -Achse gilt:

$$H = \frac{n_1}{Rl} U_R = \frac{1000}{10 \Omega \cdot 48 \text{ cm}} = 208,3 \frac{\text{A}}{\text{Vm}} \cdot U_R$$

Für die B -Achse gilt:

$$B = \frac{R_1 C}{n_2 A} \cdot U_C$$

3.3 Bestimmung des Flächenintegrals

Das Integral $\oint B dH$ wird entweder durch „Ausschneiden und wiegen“, oder durch analytische Auswertung am PC bestimmt.

Dieses Integral gibt die Ummagnetisierungsarbeit pro Volumen und Zyklus an. Somit gilt für die gesamte Ummagnetisierungs-Verlustleistung des Eisenkerns:

$$P_{\text{mag}} = \left(\frac{W_{\text{mag}}}{V} \right) \cdot \frac{V}{T} = \left(\frac{W_{\text{mag}}}{V} \right) \cdot lAf$$

Für den Verlustwiderstand gilt dann:

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

3.4 Permeabilität

Für die Wehselfeld-Permeabilität gilt:

$$\mu_r = \frac{B_1}{\mu_0 H_1}$$

wobei B_1 und H_1 die Maximalwerte beim Magnetisierungszyklus sind.

3.5 Vergleich

Die Ergebnisse werden mit denen aus Aufgabe 2 verglichen.

4 Vergleich Eisen–Ferrit

Es wird ein Eisenkern und ein Ferrit-Schalenkern untersucht. Für beide werden die Hysteresekurven wie in Aufgabe dargestellt und folgende Werte bestimmt und verglichen.

- Die Remanenz, also die Stärke des Magnetfeldes welches beim Abschalten des äußeren Magnetfeldes bestehen bleibt, wird an der Stelle $H = 0$ abgelesen, also am Schnittpunkt zwischen Hysterese und B -Achse.
- Die Koerzitivkraft, also die Feldstärke, die wirken muss, damit das Magnetfeld verschwindet, wird an der Stelle $B = 0$ abgelesen, also am Schnittpunkt zwischen Hysterese und H -Achse.
- Die Ummagnetisierungs-Verlustleistung wird wie in Aufgabe 3.3 bestimmt.
- Die Sättigungsinduktion, durch ablesen der Maximalwerte H_1 und B_1 .

Praktikum Klassische Physik I

Versuchsvorbereitung:
P1-83,84: Ferromagnetische Hysterese

Jingfan Ye
Gruppe Mo-11

Karlsruhe, 23. November 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule	2
1.1	Messung	2
1.2	Berechnung	3
2	Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit Eisenkern	3
2.1	Messung	3
2.2	Berechnung	4
3	Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste	4
3.1	Messung der Magnetisierungskurve	4
3.2	Eichung der Achsen	5
3.3	Ummagnetisierungs-Verlustleistung	5
3.4	Relative Wechselfeld-Permeabilität	6
3.5	Vergleich mit Aufgabe 2	6
4	Vergleich Eisen - Ferrit	6

1 Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule

1.1 Messung

Für einen Wechselstromkreis mit einer Spule gilt für die Impedanz Z und ihren Betrag:

$$Z = r + i\omega L; \quad |Z| = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \quad (1)$$

wobei r der Verlustwiderstand und L die Induktivität der Spule sowie \hat{U} und \hat{I} die Spitzenwerte von Spannung bzw. Stromstärke sind. ω ist die Kreisfrequenz der Wechselspannung

Für die Phasenverschiebung φ gilt:

$$\tan \varphi = \frac{\operatorname{Im} Z}{\operatorname{Re} Z} = \frac{\omega L}{r} \quad (2)$$

Beim Versuch wird die Stromstärke eingestellt und die Spitzenspannungen \hat{U} der einzelnen Bauelemente am Oszilloskop abgelesen. Man muss beachten, dass das Netzgerät den Effektivwert der Stromstärke I_{eff} anzeigt. Es gilt, wie man durch Betrachtung des sinusförmigen Verlaufs der Stromstärke erkennt, $\hat{I} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}}$.

Die experimentelle Bestimmung der Phasenverschiebung φ erfolgt durch die Messung der Zeitverschiebung von Strom und Spannung. Bei Kenntnis der Kreisfrequenz ω lässt sie sich folgendermaßen berechnen:

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\varphi}{2\pi} \Leftrightarrow \varphi = \frac{\Delta t \cdot 2\pi}{\frac{2\pi}{\omega}} = \Delta t \cdot \omega = 2\pi f \Delta t \quad (3)$$

In diesem Versuch wird die normale Frequenz von $f = 50$ Hz genommen.

Vor der Spule wird ein Vorwiderstand R geschlossen, für welchen gilt:

$$|Z| = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = \hat{U} \frac{R}{\hat{U}_R} \quad (4)$$

Mit Gleichung (1) lässt sich die Gesamtimpedanz des Systems aus den Spitzenwerten von Spannung und Strom berechnen. Da der Verlustwiderstand r dem Realteil und der Scheinwiderstand ωL dem Imaginärteil der Impedanz Z entspricht, gelten folgende Gleichungen:

$$r = \operatorname{Re} Z = |Z| \cdot \cos \varphi = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}}} \cdot \cos(2\pi f \Delta t) \quad (5)$$

$$\omega L = \operatorname{Im} Z = |Z| \cdot \sin \varphi \Leftrightarrow L = |Z| \frac{\sin \varphi}{\omega} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{eff}}} \cdot \frac{\sin(2\pi f \Delta t)}{2\pi f} \quad (6)$$

1.2 Berechnung

Die Induktivität L einer Spule ist definiert als

$$L = \frac{-U_{\text{ind}}}{\dot{I}} \quad (7)$$

Nach dem Induktionsgesetz gilt bei konstanter Fläche A und Windungszahl n :

$$U_{\text{ind}} = -nA\dot{B}$$

Mit dem Magnetfeld B einer langgestreckten Spule $B = n\mu_0\frac{I}{l}$, der Spulenlänge l und den obigen Gleichungen folgt die Formel für die Induktivität einer langgestreckten Spule:

$$L = nA\frac{\dot{B}}{\dot{I}} = n^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{l} \quad (8)$$

Für kurze Spulen muss diese Formel mit einem geometrieabhängigen Faktor k multipliziert werden. Die Spule aus unserem Versuch ist $l = 6,8$ cm lang und hat einen mittleren Wickelradius von $r_s = 3,4$ cm. Für Spulen, bei denen die Länge etwa dem dem Doppelten des mittleren Radius entspricht, gibt die Vorbereitungsmappe einen Vorfaktor von $k = 0,55$ an.

Für die mittlere Querschnittsfläche gilt $A = \pi r_s^2$, unsere Spule hat $n = 1000$ Windungen. Alles in allem besitzt sie also eine Induktivität von:

$$L_{\text{Versuch}} = \left(0,55 \cdot 1000^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi (0,034\text{m})^2}{0,068\text{m}} \right) \text{H} = 0,0369 \text{H} = 36,9 \text{mH}$$

Für den Drahtwiderstand r des Kupferdrahtes gilt:

$$r = \rho_{\text{Cu}} \frac{l_{\text{Draht}}}{A_{\text{Draht}}} \quad (9)$$

ρ_{Cu} ist der spezifische Widerstand von Kupfer, l_{Draht} die Drahtlänge A_{Draht} die Querschnittsfläche des Kupferdrahtes.

Es gelten $\rho_{\text{Cu}} = 1,78 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ (Wert aus einem alten Übungsblatt), $l_{\text{Draht}} = n \cdot 2\pi r_s + l$ und $A_{\text{Draht}} = \pi \left(\frac{r_{\text{Draht}}}{2}\right)^2$. $d_{\text{Draht}} = 0,7$ mm ist der Drahtdurchmesser.

Es gilt also:

$$r = \left(1,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1000 \cdot 2\pi \cdot 0,034 + 0,068}{\pi \left(\frac{0,0007}{2}\right)^2} \right) \Omega = 9,88 \Omega$$

2 Induktivität und Verlustwiderstand einer Spule mit Eisenkern

2.1 Messung

Die Messmethode entspricht der aus Versuch 1.1.

2.2 Berechnung

Für eine Spule mit gefülltem Eisenkern mit sehr großer Permeabilität $\mu \gg 1$ gilt:

$$L = \mu \cdot n^2 \mu_0 \frac{A}{l} \Leftrightarrow \mu = \frac{L \cdot l}{n^2 \mu_0 A} \quad (10)$$

Die Herleitung erfolgt analog wie die ohne Eisenkern. Die Permeabilitätskonstante μ kommt durch den Flussdichteterm für eine langgestreckte Spule dazu. Man muss die Induktivität einer Spule mit Eisenkern im Vergleich zu derselben Spule ohne Eisenkern mit μ multiplizieren.

Die Wechselfeld-Permeabilitätskonstante ist also der Quotient aus dem Wert der Induktivität mit Eisenkern und dem ohne Eisenkern.

$$\mu = \frac{L_{\text{Eisenkern}}}{L_{\text{Luft}}} \quad (11)$$

Die Induktivität der Eisenspule hängt vermutlich deswegen stark von der Stromstärke ab, da die Permeabilitätskonstante μ nur bei kleinen Stromstärken konstant ist. Bei größeren äußeren Feldstärken läuft die Magnetisierung des Eisenkerns gegen ihre Sättigungsinduktion zu. Dieser Effekt wird auch Hysterese genannt und wird später noch näher untersucht.

Für die Gesamtverlustleistung P der Spule gilt:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \text{Re } U(t) \text{Re } I(t) dt = \frac{\hat{I}^2 \cdot r}{2} = I_{\text{eff}}^2 \cdot r \quad (12)$$

Für $I_{\text{eff}} = 10 \text{ mA}$ beträgt die Verlustleistung $9,88 \cdot 10^{-4} \text{ W}$, für $I_{\text{eff}} = 30 \text{ mA}$ $8,892 \cdot 10^{-3} \text{ W}$.

3 Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste

3.1 Messung der Magnetisierungskurve

Am Oszilloskop soll eine Magnetisierungskurve (Hysterese) aufgetragen werden. Dabei wird die äußere magnetische Feldstärke H über die magnetische Flussdichte B im Inneren des Eisenkerns aufgetragen.

H wird über den Spannungsabfall U eines in Reihe geschalteten Widerstands R bestimmt. Es gilt nämlich:

$$H = n_a \frac{I}{l} = n_a \frac{U}{Rl} \quad (13)$$

n_a ist die Windungszahl der felderzeugenden Spule, I die durch sie fließende Stromstärke und l ihre Länge. Aufgrund der Knotenregel fließt durch die Spule genauso viel Strom wie durch den Widerstand.

B wird über die in einer zweiten Spule mit Windungszahl n_2 induzierten Spannung berechnet, für sie gilt:

$$U_{\text{ind}} = n_2 \cdot A \cdot \dot{B} \Leftrightarrow B = \frac{1}{n_2 A} \int U_{\text{ind}} dt \quad (14)$$

$\int U_{\text{ind}}$ kann man mit einem Integrierglied berechnen, welches aus Versuch „Vierpole und Leitungen“ bekannt ist. Für ein Integrierglied, also ein Tiefpass (Schaltskizze und Erklärung in der Vorbereitung zum genannten Versuch), gilt:

$$U_a = \frac{1}{R_1 C} \int (U_e - U_a) dt \quad (15)$$

Wobei jeweils R_1 der Widerstand und C die Kapazität der Kondensators des Tiefpasses sowie U_e die Eingangsspannung und U_a die Ausgangsspannung sind. Im aktuellen Versuch kann man also die Induktionsspannung U_{ind} als Eingangsspannung anlegen. Wählt man den Widerstand des Tiefpasses genug groß, also $R_1 \gg \frac{1}{\omega C}$, so dass $U_a \ll U_e$ gilt, folgt $U_a \approx \frac{1}{RC} \int U_e dt$. Man kann nun die Ausgangsspannung U_a abgreifen, mit der Beziehung:

$$B = \frac{1}{n_2 A} \int U_{\text{ind}} dt \approx \frac{RC}{n_2 A} \cdot U_a \quad (16)$$

Die magnetische Flussdichte B des Eisenkerns lässt sich so gut bestimmen.

3.2 Eichung der Achsen

Für die H -Achse gilt:

$$H = n_a \frac{U}{Rl} = 1000 \cdot \frac{U}{10\Omega \cdot 0,48\text{m}} = 208,33 \frac{\text{A}}{\text{Vm}} \cdot U \quad (17)$$

Für die B -Achse kann man bisher nur eine allgemeine Aussage treffen, da der Widerstand und der Kondensator während des Versuchs noch ausgewählt werden müssen. Bisher ist nur bekannt, dass die Spule $n_2 = 50$ Windungen besitzt, ihr Querschnitt muss aber auch noch bestimmt werden.

$$B = \frac{RC}{n_2 A} \cdot U_a$$

3.3 Ummagnetisierungs-Verlustleistung

Die Ummagnetisierungsarbeit pro Volumeneinheit $\frac{W_{\text{mag}}}{V}$ beträgt $\oint B \cdot dH$. Sie entspricht also der Fläche der Hystereskurve. Diese können wir durch Kästchen ausgleichen und zählen oder mit ausschneiden und Wiegen bestimmen. Am elegantesten lässt sich dieses Integral numerisch mit dem Computer lösen.

Das Volumen der Spule ist das Produkt aus ihrer Querschnittsfläche A und ihrer Länge l . Für die Verlustleistung P_{mag} gilt:

$$P_{\text{mag}} = \frac{W_{\text{mag}}}{V} \cdot \frac{V}{T_{\text{Zyklus}}} = \left(\oint B \cdot dH \right) \cdot \frac{A \cdot l}{T_{\text{Zyklus}}} \quad (18)$$

Für den Verlustwiderstand r_{mag} gilt:

$$r_{\text{mag}} = \frac{P_{\text{mag}}}{I_{\text{eff}}^2} \quad (19)$$

3.4 Relative Wechselfeld-Permeabilität

Die Wechselfeld-Permeabilität ist die Steigung der Schnittgeraden des aktuellen Punktes der Magnetisierungskurve mit dem Ursprung, wenn beide Achsen in B gemessen werden. Es gilt allgemein $B = \mu H$. Für μ folgt dann:

$$\mu = \frac{B_0}{\mu H_0} \quad (20)$$

Im Zähler steht also die Flussdichte des Eisenkerns, im Nenner die des äußeren Feldes. Da der Anstieg der Flussdichte im Eisen vor allem bei großem äußerem Feld gegenüber der äußeren Flussdichte nicht ganz linear verläuft, ändert sich der Wert für μ . Wir nehmen die Steigung der Maximalwerte des Magnetisierungszyklus mit dem Ursprung.

3.5 Vergleich mit Aufgabe 2

Die hier gefundenen Ergebnisse werden nun mit Aufgabe 2 verglichen. Die Verlustleistungen durch die Hysterese und den Drähten zusammen entsprechen nicht ganz der in Aufgabe 2 errechneten Gesamtverlustleistung, da Wirbelfelder zu weiteren Wärmeverlusten führen.

4 Vergleich Eisen - Ferrit

In diesem Versuch wird die Hysterese vom ferromagnetischen Eisen mit einem Ferriten verglichen. Ferrite besitzen magnetische Dipole, die entgegengerichtet sind. Anders als beim Antiferromagneten besitzen die Dipole in entgegengesetzte Richtungen beim Ferriten nicht die gleiche Stärke und heben sich damit nicht komplett auf, doch die Dipolwirkung wird stark abgeschwächt, sodass sie nach außen nur sehr schwache magnetische Eigenschaften zeigen. Sie haben gegenüber weichmagnetischem Eisen also eine noch schmalere Hysterese.

Remanenz, Koerzitivkraft, Ummagnetisierungs-Verlustleistung und die Sättigungsinduktion sollen hier von einem Eisenkern und einem Ferriten bestimmt werden:

- i) Für die **Sättigungsinduktion** kann man das äußere Feld so weit erhöhen, bis sich die Flussdichte des Eisens bzw. des Ferriten kaum noch ändert. Man kann diesen Wert dann als Sättigung annehmen.
- ii) Nun senkt man das äußere Magnetfeld wieder ab, bis sie schließlich 0 wird, die verbleibende Flussdichte des Eisens bzw. des Ferrits ist dann die **Remanenz**.

- iii) Nun erzeugt man ein entgegengerichtetes äußeres Magnetfeld, dieses soll so stark werden, dass die Flussdichte des Eisens bzw. des Ferrits 0 wird. Die Stärke des äußeren Magnetfeldes ist dann die **Koerzitivkraft**.
- iv) Führt man die Hysteresis komplett durch, kann man wie in Aufgabe 3 ihre ungeschlossene Fläche bestimmen. Sie gibt die **Ummagnetisierungs-Verlustleistung** pro Volumenheit des Eisens bzw. des Ferrits an. Multipliziert man diesen Wert mit dem Gesamtvolumen, erhält man die Verlustleistung dieses Prozesses.

Messprotokoll

Eisenmagn. Hysteresis

A 1.1

$$J_{\text{eff}} = 300 \text{ mA}$$

Widerstand

$$2\hat{U} = 9,1 \text{ V}$$

$$\text{Spule: } 2\hat{U} = 13,43 \text{ V}$$

$$\Delta t = 2,54 \text{ ms}$$

$$J_{\text{eff}} = 30 \text{ mA}$$

$$\text{Widerstand: } 2\hat{U} = 798,0 \text{ mV}$$

$$\text{Spule: } 2\hat{U} = 1,274 \text{ V}$$

$$\Delta t = 2,55 \text{ ms}$$

A 2.1

$$-J_{\text{eff}} = 30 \text{ mA}$$

$$\text{Widerstand: } 2\hat{U} = 796,0 \text{ mV} \quad (9,6 \text{ M}\Omega \text{ Vorwiderstand})$$

$$\text{Spule: } 2\hat{U} = 9,53 \cdot \text{V} \cdot 10,6$$

$$\Delta t = 2,71 \text{ ms}$$

$$J_{\text{eff}} = 70 \text{ mA}$$

$$\text{Widerstand: } 2\hat{U} = 284,5 \text{ mV}$$

$$\text{Spule: } 2\hat{U} = 24,07 \text{ V}$$

$$\Delta t = 4,16 \text{ ms}$$

Aufgabe 3.1

$10 \text{ mA} = J_{\text{eff}}$: $B_{\text{max}} \hat{=} 739,8 \text{ mV}$ $\rightarrow 0,0797 \text{ g} = m$
 $H_{\text{max}} \hat{=} 7,64 \text{ mV}$

Stromlinse vertauscht

$30 \text{ mA} = J_{\text{eff}}$: $B_{\text{max}} \hat{=} 477,0 \text{ mV}$ $\rightarrow 0,3753 \text{ g} = m$
 $H_{\text{max}} \hat{=} 72,73 \text{ mV}$

RC-Glied: $C_1 = 70 \mu\text{F}$; $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$

Eichung des Papiers: $0,7708 \text{ g pro } (10 \text{ cm})^2$

Aufgabe 4

Eisenkern ($n=250$) $J_{\text{eff}} = 200 \text{ mA}$

Sättigungsmagnetisierung: $B = 3,18 \text{ V}$

Remanenz: $1,82 \text{ V}$

Koerzitivkraft: $-30,8 \text{ mV}$

H_{max} : $40,16 \text{ mV}$

$m = 0,8855 \text{ g}$

Ferritkern: ($n=250$) $J_{\text{eff}} = 15 \text{ mA}$

Sättigung: $278,0 \text{ mV}$

Remanenz: $37,0 \text{ mV}$

Koerzitiv: $-7,28 \text{ mV}$

H_{max} : $6,05 \text{ mV}$

$m = 0,0202 \text{ g}$

[Handwritten mark]

500,0
mV
AC

UP

400,0

300,0

200,0

100,0

0,0

-100,0

-200,0

-300,0

-400,0

-500,0

-50,0
mV

A.3.1

Kurve 1
30mA

30mA

30mA

50,0
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
-10,0
-20,0
-30,0
-40,0
-50,0

UP

23.11.2009 14:14:12

1 2 Δ 1/Δ

Zeitachse 12,73 mV -- Nicht genügend Daten
Kanal B 411,0 mV --

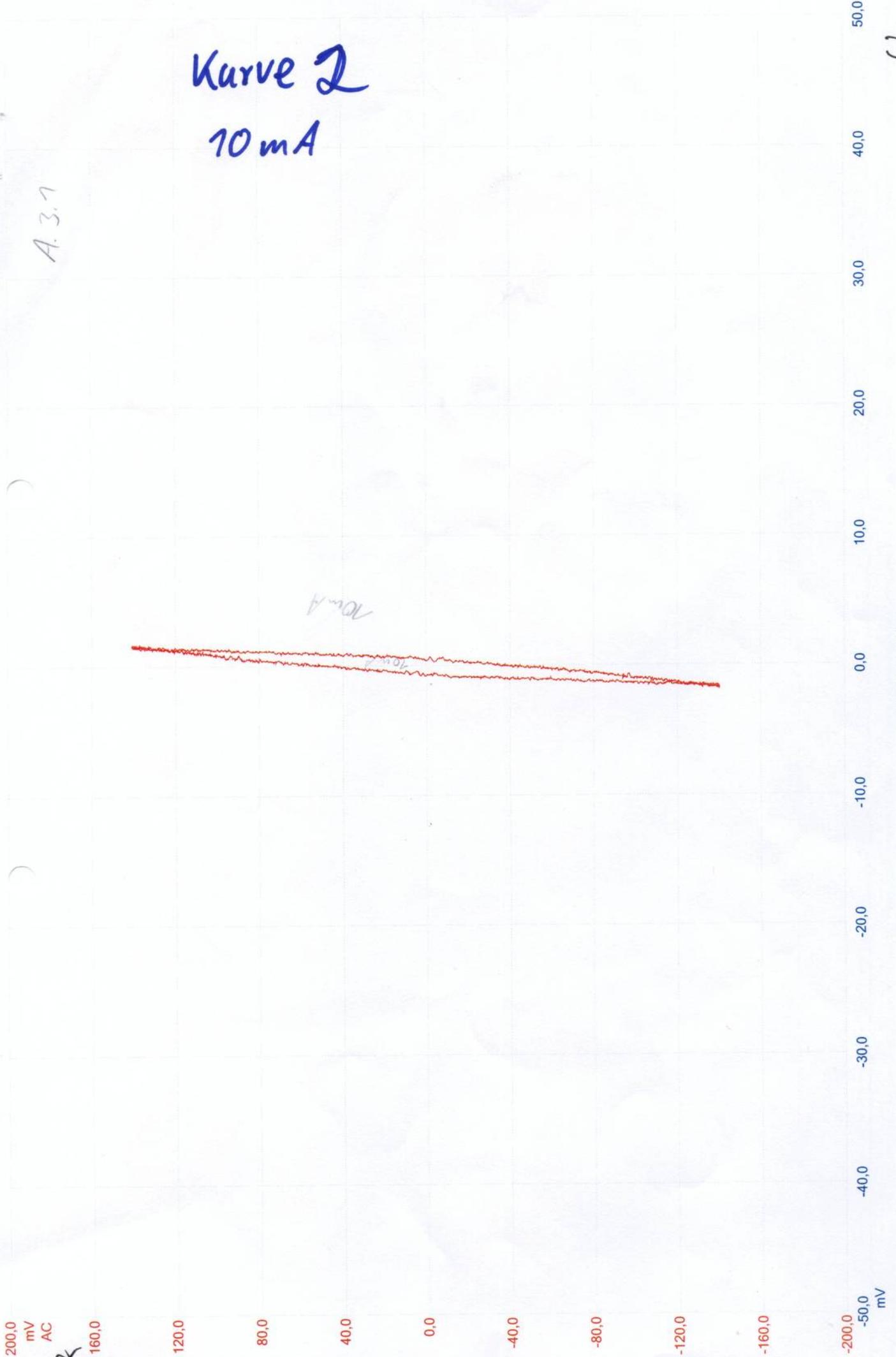
200,0
mV
AC
160,0

U_K

A.3.1

Kurve 2
10 mA

10 mA



50,0
40,0
30,0
20,0
10,0
0,0
-10,0
-20,0
-30,0
-40,0
-50,0
mV

U_K

23.11.2009 14:09:09

U_R

5,0
V
AC

4,0

3,0

2,0

1,0

0,0

-1,0

-2,0

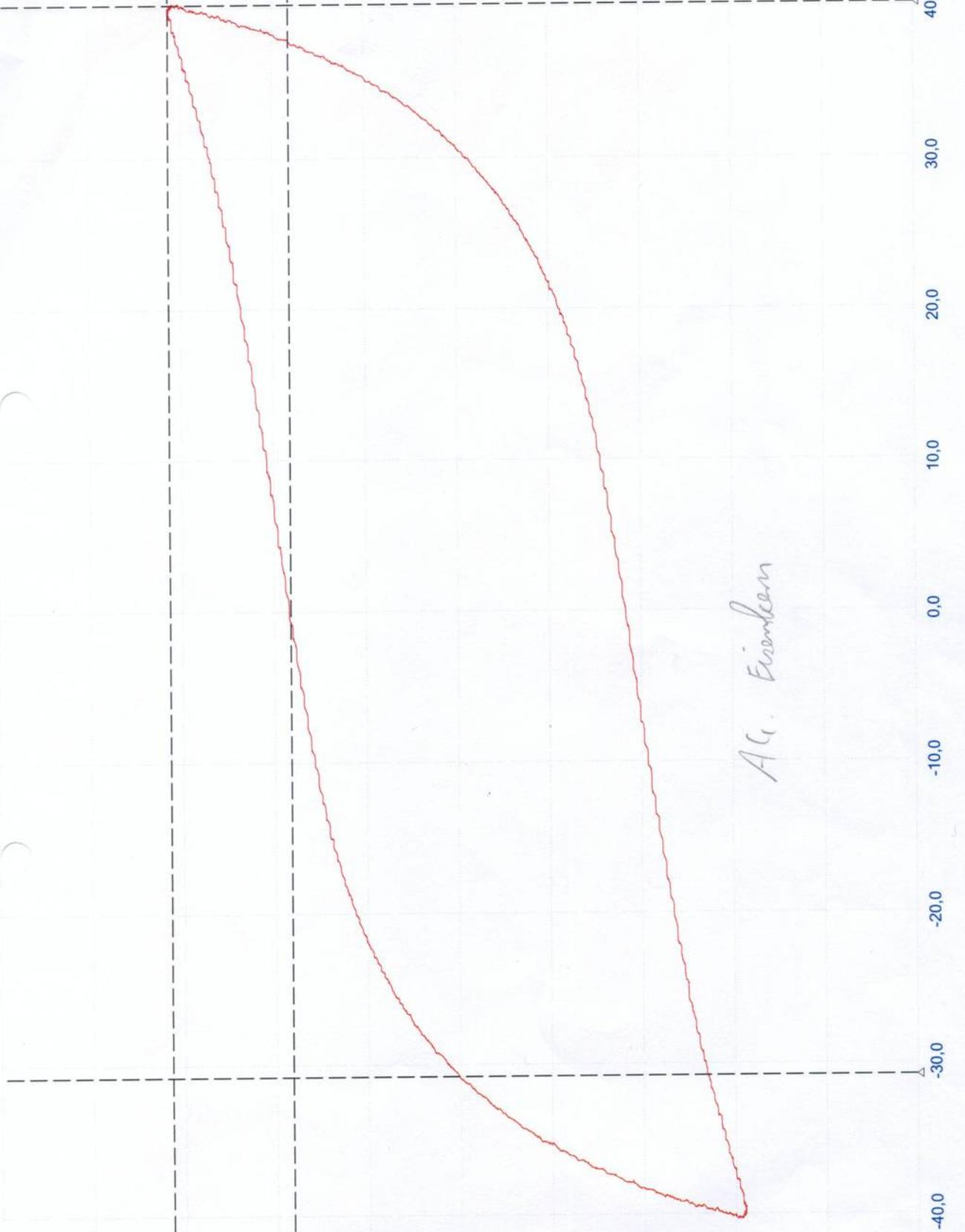
-3,0

-4,0

-5,0

-50,0
mV

Kurve 3 Eisenkern



Al. Eisenkern

U_e

50,0

40,0

30,0

20,0

10,0

0,0

-10,0

-20,0

-30,0

-40,0

1 2 Δ $1/\Delta$

Zeitachse -30,8 mV 40,16 mV 70,96 mV 14,09 Hz

Kanal B 3,13 V 1,82 V 1,31 V

23.11.2009 14:41:11

500,0 mV AC
400,0
300,0
200,0
100,0
0,0
-100,0
-200,0
-300,0
-400,0
-500,0
-50,0
-40,0
-30,0
-20,0
-10,0
0,0
10,0
20,0
30,0
40,0
50,0

U_R

A4: Ferritkern

Kurve 4
Ferritkern

23.11.2009 14:54:43

1 Δ 136,4 Hz
Zeitachse -1,28 mV 6,05 mV 7,33 mV
Kanal B 218,0 mV 37,0 mV 181,0 mV

U_C

Praktikum Klassische Physik I

Versuchsauswertung: P1-83,84: Ferromagnetische Hysterese

Christian Buntin, Jingfan Ye
Gruppe Mo-11

Karlsruhe, 23. November 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule	2
1.1	Messung	2
1.2	Theoretische Werte und Vergleich	4
2	Induktivität und Verlustleistung einer Spule mit geschlossenem Eisenkern	4
2.1	Messung	4
2.2	Berechnung der Permeabilität und der Gesamtverlustleistung	5
3	Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste	6
3.1	Oszilloskopische Darstellung	6
3.2	Eichung der Achsen	6
3.3	Bestimmung des Flächenintegrals	6
3.4	Permeabilität	8
3.5	Vergleich	8
4	Vergleich Eisen–Ferrit	9

1 Induktivität und Verlustwiderstand einer Luftspule

1.1 Messung

Wir verbanden die Spule mit $n = 1000$ Windungen mit einer Wechselspannungsquelle der Frequenz $f = 50$ Hz und schalteten dazu einen 10Ω Widerstand in Reihe.

In dieser Anordnung führten wir zwei Messungen durch, einmal mit der Effektivstromstärke $I_{\text{eff}} = 300$ mA und das zweite mal mit $I_{\text{eff}} = 30$ mA. Dabei maßen wir die Stromstärke mit einem in Reihe geschalteten analogen Amperemeter.

Die Spannung der Spule und des Widerstands griffen wir mit einem Oszilloskop ab, welches die gemessenen Daten gleich an einen nebenstehenden Computer weiterleitete. Auf dem Bildschirm erschienen zwei sinusförmige Kurven für die zeitliche Spannungsentwicklung des Widerstands und der Spule. Glücklicherweise konnte man in dem Programm, welches die Kurven anzeigte, waagerechte und lotrechte Balken entlang den Achsen ziehen, zu denen das Programm sofort den Achsenwert angab. Wir zogen immer zwei solcher parallelen Balken jeweils zum oberen und zum unteren Spitzenwert der Spannung und lasen die Differenz ab, die dem doppelten Spitzenwert $2\hat{U}$ entspricht. Auf diese Weise bestimmten wir \hat{U} von Spule und Widerstand.

Da das Oszilloskop nur einen Ground-Anschluss besaß, mussten wir beide Eingänge, also den für die Spule und den für den Widerstand, am selben Ort erden. Da dadurch eines der beiden Anschlüsse sozusagen falschherum eingesteckt werden musste, maß das Oszilloskop das invertierte Signal. Am Oszilloskop konnten wir mit einem Knopf die falsche Kurve wieder richtig invertieren.

Aus der Zeitverschiebung Δt ließ sich dann die Phasenverschiebung φ über die Formel aus der Vorbereitung bestimmen:

$$\varphi = 2\pi f \Delta t \quad (1)$$

Die Messergebnisse:

I_{eff} in mA	Schaltelement	$2\hat{U}$ in V	Δt in ms	φ
300	Widerstand	9,10	2,54	0,798
	Spule	13,43		
30	Widerstand	0,798	2,55	0,801
	Spule	1,274		

Tabelle 1: Messwerte der Luftspule mit 1000 Windungen

Die Impedanz $|Z|$ lässt sich, wie aus der Vorbereitung bekannt, aus dem Quotient der Spitzenwerte für Spannung und Strom berechnen:

$$|Z| = \frac{\hat{U}_{\text{Spule}}}{\hat{I}} = \hat{U}_{\text{Spule}} \cdot \frac{R}{\hat{U}_R}; \quad \text{mit } \hat{I} = \frac{\hat{U}_R}{R} \quad (2)$$

Mit den folgenden Gleichungen, die alle in der Vorbereitung gezeigt wurden, lassen sich nun der Verlustwiderstand r und die Induktivität L der Spule berechnen:

$$r = |Z| \cdot \cos \varphi = \frac{\hat{U}_{\text{Spule}}}{\hat{I}} \cdot \cos \varphi = \frac{\hat{U}_{\text{Spule}} \cdot R}{\hat{U}_R} \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

$$L = |Z| \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \sin \varphi = \frac{\hat{U}_{\text{Spule}}}{\hat{I} \cdot 2\pi f} \cdot \sin \varphi = \frac{\hat{U}_{\text{Spule}} \cdot R}{\hat{U}_R \cdot 2\pi f} \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

Mit den Informationen aus Tabelle (1), den bekannten Größen des Vorwiderstands $R = 10 \Omega$ und der Frequenz $f = 50 \text{ Hz}$ sowie den obigen Formeln folgt:

I_{eff} in mA	Impedanz $ Z $ in Ω	Verlustwiderstand r in Ω	Induktivität L in mH
300	14,76	10,303	33,6
30	15,96	11,111	36,5

Tabelle 2: Impedanz, Verlustwiderstand und Induktivität der Luftspule

Wir sehen, dass sowohl der Verlustwiderstand als auch die Induktivität bei beiden sehr unterschiedlichen Stromstärken in etwa gleich sind. Dies entspricht der Erwartung aus dem Hinweis der Versuchsanweisung, beide Werte der Luftspule hingen nicht von der Stromstärke ab.

Mit der bekannten Beziehung $\hat{I} = \sqrt{2}I_{\text{eff}}$, welche man aus dem sinusförmigen Verlauf der Stromstärke gewinnen kann, hätte man ebenfalls den Spitzenwert der Stromstärke ausrechnen können. Wir haben aber mit dem Spitzenwert der Stromstärke gerechnet, welche sich aus der Messung der Spitzenspannung des Vorwiderstands ergab. Denn hier konnten wir mit dem Oszilloskop direkt Spitzenwerte ablesen, wohingegen das Amperemeter, durch welches zwar Wechselstrom floss, aber die Effektivstromstärke anzeigte, größere Fehler aufweist.

Für den ersten Versuch, bei dem das Amperemeter eine Effektivstromstärke von $I_{\text{eff}} = 300 \text{ mA}$ anzeigte, maßen wir über den Vorwiderstand $\hat{I} = 455 \text{ mA}$. Rechnerisch entspräche dieser Wert $I_{\text{eff}} = 322 \text{ mA}$. Für den zweiten Versuch maßen wir mit dem Vorwiderstand $\hat{I} = 39,9 \text{ mA}$, was rechnerisch $I_{\text{eff}} = 28,2 \text{ mA}$ entsprach. Die Werte passen also zueinander. Die Diskrepanz kann an Verlusten beim Messvorgang des Amperemeters liegen.

1.2 Theoretische Werte und Vergleich

In der Vorbereitung wurden die theoretischen Werte für die Induktivität L_{theo} und den Verlustwiderstand r_{theo} mit den gegebenen Spulendaten berechnet. Diese betragen:

$$L_{\text{theo}} = 36,9 \text{ mH}$$

$$r_{\text{theo}} = 9,88 \Omega$$

Diese Werte passen wunderbar zu unseren Messwerten. Allerdings floss in die Berechnung des theoretischen Wertes der Induktivität ein konstanter Vorfaktor k mit ein, der sich mit der Geometrie der Spule rechtfertigen ließ. Es ist aber anzunehmen, dass dieser Vorfaktor experimentell bestimmt wurde. Insofern sind unsere Ergebnisse für die Induktivität nur bedingt Indizien für die Gültigkeit der Theorie.

Bemerkenswert ist aber, dass wir durch die Messung des Verlustwiderstands festgestellt haben, dass dieser dem Widerstand des Drahtes entsprach (mit kleinen Abweichungen).

2 Induktivität und Verlustleistung einer Spule mit geschlossenem Eisenkern

2.1 Messung

Nun steckten wir dieselbe Luftspule aus Versuch 1 in einen Eisenring, sodass der Innenraum der Spule komplett mit Eisen gefüllt war. Anschließend führten wir dieselben Messungen wie bei Versuch 1 durch, diesmal jedoch mit den Effektivstromstärken 30 mA und 10 mA.

Bei der Messung der Spitzenspannung der Spule bei $I_{\text{eff}} = 30 \text{ mA}$ war die Amplitude der Spannung so groß, dass die Spitzenwerte auf dem Bildschirm nicht mehr zu erkennen waren. Um die Spitzenspannung aber trotzdem messen zu können, behelfen wir uns mit einem Vorwiderstand mit $9,6 \text{ M}\Omega$, den wir in Reihe schalteten. Der Innenwiderstand des Oszilloskops betrug $1 \text{ M}\Omega$. Wir mussten in diesem Fall also den angezeigten Wert der Spannung mit $\frac{9,6+1}{1} = 10,6$ multiplizieren.

Die Messergebnisse:

I_{eff} in mA	Schaltelement	$2\hat{U}$ in V	Δt in ms	φ
30	Widerstand	0,796	2,71	0,851
	Spule	101,0		
10	Widerstand	0,2845	4,16	1,307
	Spule	24,07		

Tabelle 3: Messwerte der Spule im geschlossen Eisenkern mit 1000 Windungen

Mit den Gleichungen (2), (3), (4) sowie den bekannten festen Daten $R = 10 \Omega$ und $f = 50 \text{ Hz}$ lässt sich berechnen:

I_{eff} in mA	Impedanz $ Z $ in Ω	Verlustwiderstand r in Ω	Induktivität L in H
30	1269,07	836,61	3,04
10	846,05	220,60	2,60

Tabelle 4: Impedanz, Verlustwiderstand und Induktivität der Spule mit geschlossenem Eisenkern

Man sieht an diesen Werten deutlich, dass bei einer Spule mit Eisenkern Impedanz, Verlustwiderstand und Induktivität stark von der Stromstärke abhängen.

2.2 Berechnung der Permeabilität und der Gesamtverlustleistung

Für große Permeabilitäten $\mu \gg 1$ kann man für die Induktivität der Spule annehmen, dass sie um den μ größer ist also im Vakuum bzw. in der Luft. Daraus folgt:

$$L = \mu \cdot n^2 \mu_0 \frac{A}{l} \Leftrightarrow \mu = \frac{L \cdot l}{n^2 \mu_0 A} \quad (5)$$

Im Gegensatz zur Berechnung der Induktivität der Luftspule muss man hier für die Fläche A und die Länge l die Größen des Eisenkerns nehmen. Die quadratische Querschnittsfläche A beträgt $A = 3,9 \text{ cm} \cdot 3,9 \text{ cm} = 1,521 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Die durchschnittliche Feldlinienlänge l ist laut der Anweisung angegeben als $l = 48 \text{ cm} = 0,48 \text{ m}$.

Für die Verlustleistung gilt (in der Vorbereitung hergeleitet):

$$P = I_{\text{eff}}^2 \cdot r \quad (6)$$

Mit den Ergebnissen aus Tabelle (4) folgt:

I_{eff} in mA	Permeabilität μ	Verlustleistung P in W
30	763	0,75
10	653	0,022

Tabelle 5: Impedanz, Verlustwiderstand und Induktivität der Spule mit geschlossenem Eisenkern

Für die Effektivstromstärken wurden hier wiederum die Werte 30 mA bzw. 10 mA genommen, da diese direkt mit dem Amperemeter gemessen wurden.

3 Ferromagnetische Hysterese und Ummagnetisierungsverluste

3.1 Oszilloskopische Darstellung

Die Hysteresekurve wurde wie in der Aufgabenstellung vorgegeben auf dem Oszilloskop dargestellt. Dabei haben wir für das RC-Glied den Widerstand $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ und den Kondensator $C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$ verwendet. Allerdings haben wir die Anschlüsse für X- und Y-Ablenkung vertauscht, was aber an der Art der Kurve nichts ändert.

Die ausgedruckten Hysteresekurven finden sich beim Messprotokoll, Kurve 1 zeigt die Hystereseschleife bei einem Spulenstrom von 30 mA, Kurve 2 bei 10 mA.

3.2 Eichung der Achsen

Für die H -Achse gilt:

$$H = \frac{n_1}{Rl} U_R = \frac{1000}{10 \text{ }\Omega \cdot 48 \text{ cm}} = 208,3 \frac{\text{A}}{\text{Vm}} \cdot U_R$$

Für die B -Achse gilt:

$$B = \frac{R_1 C_1}{n_2 A} \cdot U_C = \frac{100 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ }\mu\text{F}}{50 \cdot (3,9 \text{ cm})^2} \cdot U_C = 13,15 \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \cdot U_C$$

3.3 Bestimmung des Flächenintegrals

Das Integral $\oint B \text{ d}H$ haben wir durch Ausschneiden und Wiegen der ausgedruckten Kurve bestimmt.

Um die Messmethode für das Papier zu eichen, haben wir ein 100 cm^2 großes Stück des Papiers gewogen und dadurch dessen Flächendichte σ bestimmt.

$$\sigma = \frac{\text{Masse}}{\text{Fläche}} = \frac{m_{\text{Papier}}}{A_{\text{Papier}}} = \frac{0,7708 \text{ g}}{100 \text{ cm}^2} = 7,708 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} = 77,08 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$$

Damit lässt sich die Fläche $A = \frac{m}{\sigma}$ der ausgeschnittenen Kurve mit der Masse m berechnen.

Anhand der Skalen auf den Ausdrucken lässt sich mittels Eichung aus Aufgabe 3.2 berechnen, welche Strecke s welcher Flussdichte B bzw. Feldstärke H entspricht. Dazu benötigt man das Verhältnis einer Spannungsdifferenz ΔU zur dazugehörigen Strecke Δs auf der Skala:

$$\frac{H}{s_H} = \frac{\Delta H}{\Delta s_H} = 208,3 \frac{\text{A}}{\text{Vm}} \cdot \frac{\Delta U_R}{\Delta s_H} \quad (7)$$

$$\frac{B}{s_B} = \frac{\Delta B}{\Delta s_B} = 13,15 \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\Delta U_C}{\Delta s_B} \quad (8)$$

Somit lässt sich die Ummagnetisierungsarbeit pro Volumen pro Papierfläche mittels Gleichungen 7 und 8 bestimmen:

$$\frac{\frac{W_{\text{mag}}}{V}}{A} = \frac{H}{s_H} \cdot \frac{B}{s_B} = 2739 \frac{\text{J}}{\text{V}^2 \text{m}^3} \cdot \frac{\Delta U_R}{\Delta s_H} \cdot \frac{\Delta U_C}{\Delta s_B}$$

Daraus folgt also für die Ummagnetisierungsarbeit pro Volumen und Zyklus:

$$\frac{W_{\text{mag}}}{V} = \frac{\frac{W_{\text{mag}}}{V}}{A} \cdot \frac{m}{\sigma} = 35,54 \frac{\text{J}}{\text{gV}^2 \text{m}} \cdot \frac{\Delta U_R}{\Delta s_H} \cdot \frac{\Delta U_C}{\Delta s_B} \cdot m \quad (9)$$

Mit dem Volumen $V \approx A \cdot l = (3,9 \text{ cm})^2 \cdot 48 \text{ cm} = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ des Eisenkerns und der Netzfrequenz $f = 50 \text{ Hz}$ ergibt sich eine Ummagnetisierungs-Verlustleistung von

$$P_{\text{mag}} = \frac{W_{\text{mag}}}{V} \cdot V \cdot f = 1,29735 \frac{\text{Jm}^2}{\text{sgV}^2} \cdot \frac{\Delta U_R}{\Delta s_H} \cdot \frac{\Delta U_C}{\Delta s_B} \cdot m \quad (10)$$

Für den Verlustwiderstand gilt dann:

$$R_S = \frac{P_{\text{mag}}}{I_{\text{eff}}^2} \quad (11)$$

Somit folgt für die beiden eingestellten Spulenströme nach Gleichung 9 und 10:

i) Kurve 1: $I = 30 \text{ mA}$

Gewicht der Kurve: $m = 0,3153 \text{ g}$

Abgelesene Skalierungen: $\Delta U_C = 0,1 \text{ V}$, $\Delta s_B = 0,269 \text{ m}$; $\Delta U_R = 1 \text{ V}$, $\Delta s_H = 0,163 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{W_{\text{mag}}}{V} &= 25,557 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \\ \Rightarrow P_{\text{mag}} &= 933 \text{ mW} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich nach Gleichung 11 ein Verlustwiderstand von

$$R_S = 1037 \Omega$$

ii) Kurve 2: $I = 10 \text{ mA}$

Gewicht der Kurve: $m = 0,0191 \text{ g}$

Abgelesene Skalierungen: $\Delta U_C = 0,1 \text{ V}$, $\Delta s_B = 0,269 \text{ m}$; $\Delta U_R = 0,4 \text{ V}$, $\Delta s_H = 0,173 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{W_{\text{mag}}}{V} &= 583,46 \frac{\text{mJ}}{\text{m}^3} \\ \Rightarrow P_{\text{mag}} &= 21,3 \text{ mW} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich nach Gleichung 11 ein Verlustwiderstand von

$$R_S = 213 \Omega$$

Zusammenfassung:

	Kurve 1	Kurve 2
Spulenstrom:	30 mA	10 mA
Masse der Fläche:	0,3153 g	0,0191 g
Ummagnetisierungsarbeit pro Volumen und Zyklus:	25557 $\frac{\text{mJ}}{\text{m}^3}$	583,46 $\frac{\text{mJ}}{\text{m}^3}$
Ummagnetisierungs-Verlustleistung:	933 mW	21,3 mW
Verlustwiderstand:	1037 Ω	213 Ω

Somit ist, wie man sieht, bei größerer Stromstärke auch die Verlustleistung größer.

3.4 Permeabilität

Wir haben am Computer die maximalen Werte für U_R und U_C abgelesen und daraus B_1 und H_1 eines Zyklus bestimmt (Umgerechnet nach Aufgabe 3.2). Für die Wechselfeld-Permeabilität gilt dann:

$$\mu_r = \frac{B_1}{\mu_0 H_1}$$

Messwerte:

	Kurve 1	Kurve 2
Spulenstrom:	30 mA	10 mA
U_R :	411,0 mV	139,8 mV
U_C :	12,37 mV	1,64 mV
H_1 :	85,6 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$	29,1 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$
B_1 :	167,4 mT	21,6 mT
μ_r :	1556	590

3.5 Vergleich

Für $I_{\text{eff}} = 10 \text{ mA}$ stimmen Permeabilitätszahl und Verlustwiderstand gut mit Aufgabe 2 überein. Dabei ist zu beobachten, dass die Ummagnetisierungs-Verlustleistung zusammen mit der Verlustleistung am Draht $R_L I_{\text{eff}}^2$ nicht ganz der Gesamtverlustleistung entspricht:

$$0,021 \text{ W} + 0,001 \text{ W} \lesssim 0,022 \text{ W}$$

Für $I_{\text{eff}} = 30 \text{ mA}$ zeigt sich dies aufgrund unterschiedlicher Messwerte leider nicht.

4 Vergleich Eisen–Ferrit

Wir haben einen Eisenkern (250 Windungen, $I_{\text{eff}} = 200 \text{ mA}$) und einen Ferrit-Schalenkern (250 Windungen, $I_{\text{eff}} = 15 \text{ mA}$) untersucht, für beide die Hysteresekurven wie in Aufgabe 3.1 dargestellt und folgende Werte bestimmt und verglichen:

Da wir nun andere Spulendaten haben, muss die Eichung neu durchgeführt werden.

- Für die H -Achse gilt für den Eisenkern:

$$H = \frac{n_1}{Rl} U_R = \frac{250}{10 \Omega \cdot 48 \text{ cm}} = 52,08 \frac{\text{A}}{\text{Vm}} \cdot U_R$$

- Die B -Achse für den Eisenkern ändert sich nicht, es gilt weiterhin:

$$B = 13,15 \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \cdot U_C$$

- Für die H -Achse gilt für den Ferritkern:

$$H = \frac{n_1}{Rl} U_R = \frac{250}{10 \Omega \cdot 10,5 \text{ cm}} = 238,1 \frac{\text{A}}{\text{Vm}} \cdot U_R$$

- Für die B -Achse gilt für den Ferritkern:

$$B = \frac{R_1 C_1}{n_2 A} \cdot U_C = \frac{100 \text{ k}\Omega \cdot 10 \mu\text{F}}{50 \cdot 6,25 \text{ cm}^2} \cdot U_C = 32 \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \cdot U_C$$

Somit bekommen wir folgende Werte für Eisen- und Ferritkern:

- Die Remanenz, also B an der Stelle $H = 0$:

$$\text{Eisenkern: } U_C = 30,8 \text{ mV} \Rightarrow B_R = 405 \text{ mT}$$

$$\text{Ferritkern: } U_C = 1,28 \text{ mV} \Rightarrow B_R = 40,96 \text{ mT}$$

- Die Koerzitivkraft, also H an der Stelle $B = 0$:

$$\text{Eisenkern: } U_R = 1,82 \text{ V} \Rightarrow H_C = 94,79 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$\text{Ferritkern: } U_R = 37,0 \text{ mV} \Rightarrow H_C = 8,81 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- Die Sättigungsinduktion B_S , durch ablesen des Maximalwertes von B :

$$\text{Eisenkern: } U_C = 40,16 \text{ mV} \Rightarrow B_S = 528,1 \text{ mT}$$

$$\text{Ferritkern: } U_C = 6,05 \text{ mV} \Rightarrow B_S = 193,6 \text{ mT}$$

- Die Ummagnetisierungs-Verlustleistung (wie in Aufgabe 3.3):
 - i) Eisenkern (Kurve 3): Gewicht der Kurve: $m = 0,8855 \text{ g}$
 Abgelesene Skalierungen: $\Delta U_C = 0,1 \text{ V}$, $\Delta s_B = 0,269 \text{ m}$; $\Delta U_R = 10 \text{ V}$,
 $\Delta s_H = 0,163 \text{ m}$;
 $l = 48 \text{ cm}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $A = (3,9 \text{ cm})^2$

$$P_{\text{mag}} = \frac{m}{\sigma} \frac{H}{s_H} \cdot \frac{B}{s_B} \cdot l A f$$

$$= 6550 \text{ mW}$$

- ii) Ferrit-Kern (Kurve 4): Gewicht der Kurve: $m = 0,0202 \text{ g}$
 Abgelesene Skalierungen: $\Delta U_C = 0,1 \text{ V}$, $\Delta s_B = 0,269 \text{ m}$; $\Delta U_R = 1 \text{ V}$,
 $\Delta s_H = 0,163 \text{ m}$;
 $l = 10,5 \text{ cm}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $A = 6,25 \text{ cm}^2$

$$P_{\text{mag}} = \frac{m}{\sigma} \frac{H}{s_H} \cdot \frac{B}{s_B} \cdot l A f$$

$$= 14,94 \text{ mW}$$

Zusammenfassung der Messwerte:

	Eisenkern	Ferritkern
Spulenstrom:	200 mA	15 mA
Masse der Fläche:	0,8855 g	0,0202 g
Ummagnetisierungs-Verlustleistung:	6550 mW	14,94 mW
Sättigungsinduktion:	528,1 mT	193,6 mT
Remanenz:	405 mT	40,96 mT
Koerzitivkraft:	94,79 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$	8,81 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$

Der Ferrit-Kern hat somit eine extrem geringere Verlustleistung als der Eisenkern. Daher werden Ferrite oft für Spulen hoher Güte verwendet. Der Eisenkern dagegen hat eine wesentlich höhere Sättigungsinduktion, weshalb sich dieser besonders gut für Transformatoren oder Elektromagneten eignet.