

Aufgabe I: Induktion

1. Thomson Ringversuch

1.1 Beschreibe den Thomson'schen Ringversuch in Aufbau und Beobachtung und erkläre die grundlegenden physikalischen Ursachen für die Versuchsbeobachtung. Beschreibe und erkläre die veränderte Beobachtung, wenn der Ring am abheben gehindert wird.

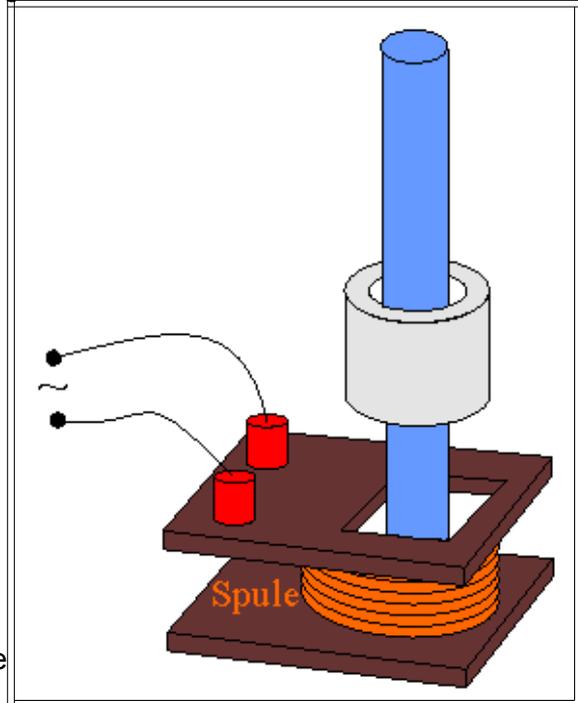
- Skizze oder gleichwertige Versuchsbeschreibung.
- Ring wird abgeschossen, wenn Wechselspannung eingeschaltet wird

Erforderliche Stichpunkte im erklärenden Text:

- Induktion
- Wechselspannung
- Änderung Magnetfeld
- Wirbelstrom (oder Lorentzkraft)
- Lenz'sche Regel
- Ring wird warm wegen Wirbelstrom und Ohmschen Widerstands des Rings.

Zwei Versuchsabwandlungen wurden im Unterricht nicht durchgeführt:

1. Wird statt eines geschlossenen Aluminiumrings eine Ring mit einem Schlitz benutzt, hebt der Ring kaum ab.



Erkläre, warum der Versuch mit dem geschlitzten Ring nicht mehr gut klappt, aber erkläre auch, warum überhaupt noch ein (geringer) Effekt zu sehen ist.

- Es kann kein Wirbelstrom mehr entstehen.
- Die wechselnde Induktionsspannung bewirkt eine ständige Ladungsverschiebung von einem Ende zum anderen. Dies entspricht einem kleinen Strom.

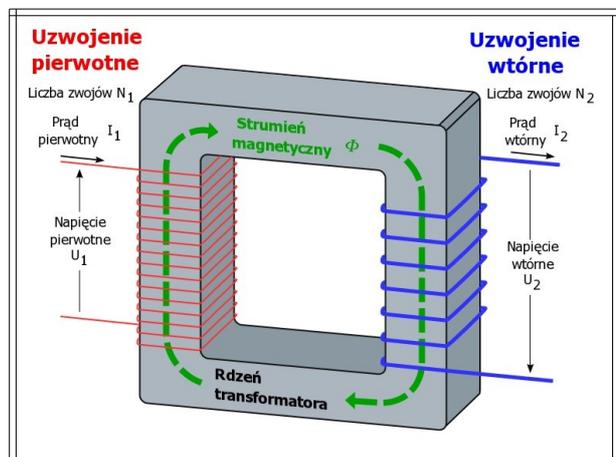
2. Kühlt man den Ring zuvor mit flüssigem Stickstoff, so wird der Effekt verstärkt.

Erkläre auch diese Beobachtung.

- Die Leitfähigkeit wird erhöht

2. Transformator

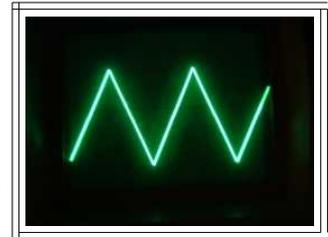
Zwei Spulen haben einen gemeinsamen Eisenkern. An der einen Spule wird eine (veränderliche) Spannung angelegt und die Stromstärke gemessen, an der anderen Spule wird eine Spannung gemessen. Optional kann die zweite Spule zu einem zweiten Stromkreis mit einem Verbraucher und einer weiteren Strommessung ergänzt werden.



Durch die Magnetisierung des gemeinsamen Eisenkerns entspricht dieser Versuchsaufbau einer Feldspule mit einer Induktionsspule im Inneren. Ein solcher Aufbau wird Transformator genannt.

Die Länge der ersten Spule beträgt $l=50\text{ cm}$, ihre Windungszahl $n_1=600$ und ihr ohmscher Widerstand betrage $R_1=100\ \Omega$. Die Induktionsspule hat $n_2=3600$ Windungen. Der Eisenkern hat einen Querschnittsflächeninhalt von $A=12\text{ cm}^2$. Die Permeabilität von Eisen betrage $\mu_r=1000$.

2.1 Wir legen an der ersten Spule eine Dreiecksspannung an. Innerhalb von 5 s steigt die Spannung auf einen Maximalwert, in den nächsten 5 s sinkt sie wieder auf null, usw. . An der zweiten Spule wird nur die Spannung gemessen.



Wir vernachlässigen im folgenden die Effekte des Magnetfeldaufbaus und Magnetfeldabbaus in Folge der Umkehrung der Steigung der Spannung (das ist Thema von Aufgabe II).

Nach 1 s wird die Stromstärke $I_1=0,2\text{ A}$ gemessen. Berechne die induzierte Spannung.

$$B = \mu_0 \mu_r I \frac{n}{l} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 1000 \cdot 0,2\text{ A} \cdot \frac{600}{0,5\text{ m}} = 0,3015928947 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 0,30\text{ T}$$

$$U_{\text{ind}} = -n_2 A \frac{\Delta B}{\Delta t} = -3600 \cdot \frac{12}{10000} \text{ m}^2 \cdot \frac{0,30\text{ T}}{1\text{ s}} = -1,302881305\text{ V}$$

A: Die induzierte Spannung beträgt -1,3 V.

Vergleiche die magnetische Flussdichten in einer Schaltung ohne Verbraucher an der Induktionsspule und in einer Schaltung mit einem Verbraucher ($R_2=50\ \Omega$) an der Induktionsspule.

Ohne Verbraucher spielt nur das äußere Magnetfeld der Spule eine Rolle. Das beträgt 0,3 T. (s.o.) Mit Verbraucher erzeugt die Induktionsspule ein eigenes Magnetfeld. Durch den Widerstand fließt ein Strom. Dieser erzeugt im Inneren der Induktionsspule ein Magnetfeld, das dem äußeren Magnetfeld entgegen gerichtet ist (Lenzsche Regel).

$$I = \frac{U}{R} = \frac{-1,3029\text{ V}}{50\ \Omega} = -0,026058\text{ A}$$

$$B_2 = -x B_A \Leftrightarrow \mu_0 \mu_r I_2 \frac{n_2}{l} = -x \mu_0 \mu_r I_1 \frac{n_1}{l} \Leftrightarrow I_2 = -x \frac{n_1}{n_2} I_1 \Leftrightarrow x = -\frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{I_2}{I_1} = 0,781$$

oder $B_2 = \mu_0 \mu_r I \frac{n}{l} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 1000 \cdot (-0,026058)\text{ A} \cdot \frac{3600}{0,5\text{ m}} = 0,2358\text{ T}$

A: Das induzierte Magnetfeld mit Verbraucher beträgt 78% des Magnetfeldes ohne Verbraucher.

Im folgenden sollen die Kenngrößen der Spulen so verändert werden, dass bei einem Maximalwert von 230 V der Dreiecksspannung (Periode nach wie vor 10 s) eine Glühlampe mit 12 V an der Induktionsspule betrieben werden kann. Berechne eine gültige Lösung.

Strom der ersten Spule nach 5 s: $I(5s) = \frac{230V}{100\Omega} = 2,3 A$. Da linear: $I(1s) = 2,3 \frac{A}{5} = 0,46 A$

$$B(1s) = \mu_0 \mu_r I(1s) \frac{n}{l} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \cdot 1000 \cdot 0,46 A \cdot \frac{600}{0,5m} = 5 \cdot 10^{-8} \frac{Vs}{m^2} = 0,6936636579 T$$

$$U_{ind} = -n_2 A \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Alle Größen rechts können so angepasst werden, dass $U_{ind} = 12V$

herauskommt. Am einfachsten ist es, die äußere Spule unverändert zu lassen und n_2 oder A zu verändern.

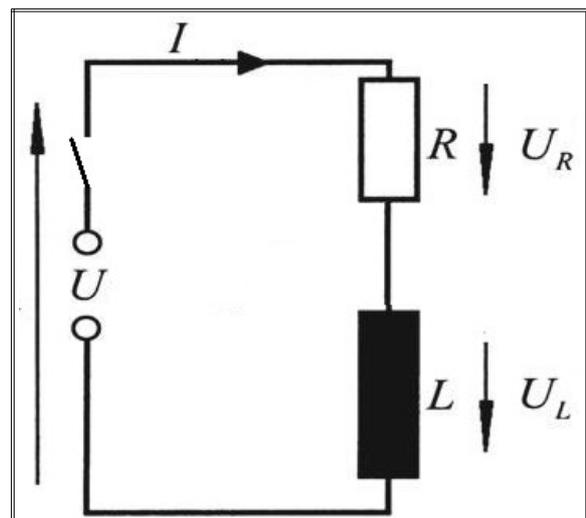
$$n_2 = -\frac{U_{ind} \Delta t}{A \Delta B} = \frac{12V \cdot 10000}{12} m^{-2} \cdot \frac{1s}{0,6937Vs m^{-2}} = 14416,21$$

A: Bei einer Induktionsspule mit 14.416 Windungen kann man theoretisch eine 12V-Lampe betreiben.

Aufgabe II: Selbstinduktion

1. Reihenschaltung von Spule und Widerstand

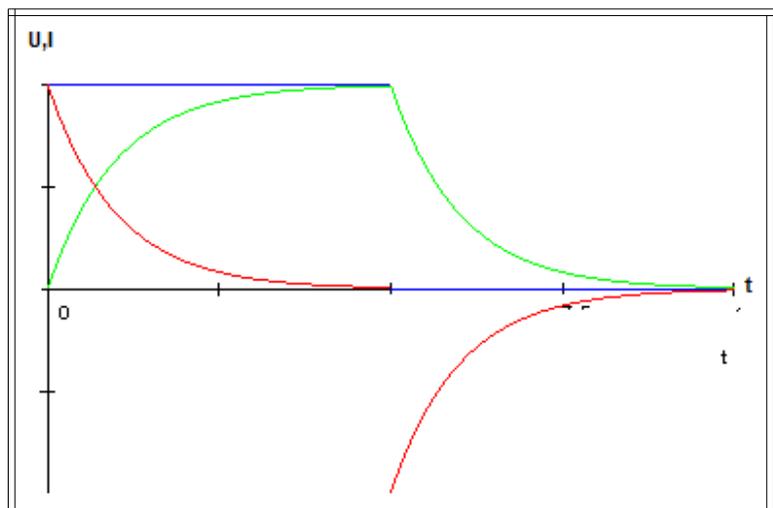
1.1 Skizziere eine Reihenschaltung von Spule und Widerstand mit Messgeräten, so wie im Unterricht besprochen. Beschreibe die Versuchsdurchführung und die Versuchsbeobachtung mit Hilfe eines Diagramms, dass die Gesamtspannung, sowie die Spannung über Spule und Widerstand anzeigt. Erkläre die physikalischen Grundlagen der Versuchsbeobachtung.



- Skizze Versuchsaufbau
- Durchführung: Ein- und Ausschalten der Spannung
- Skizze: Beobachtung

Erforderliche Stichpunkte im erklärenden Text:

- Selbstinduktion
- Lenz'sche Regel
- Summe der Spannungen
- stabil, sobald Magnetfeld aufgebaut
- gleiches beim Ausschalten



Betrachten wir eine veränderte Versuchsdurchführung, indem die Schaltung mit einer sehr schnellen Wechselspannung versorgt wird. Beschreibe und erkläre die voraussichtliche Versuchsbeobachtung.

Beim Einschalten gilt: $I(t) = -\frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$. Der Strom steigt also von null exponentiell in eine

Sättigung. Ist nicht genug Zeit, bevor wieder ausgeschaltet wird, bzw. die Polung der Wechselspannung gewechselt wird, so erreicht der Strom die Sättigung nicht. Ist die Frequenz der Wechselspannung sehr groß, so wird die Stromstärke nur leicht um die Nulllinie pendeln. Die Spule lässt also einen schnellen Wechselstrom nicht durch.

1.2 Stelle eine Gleichung für die Summe der beteiligten Spannungen auf, leite diese ab und leite daraus die Differentialgleichung $\frac{R}{L}U_L(t) + \dot{U}_L(t) = 0$ her. Löse diese Differentialgleichung und

leite so die Formel für zeitliche Abhängigkeit der Stromstärke $I_R(t) = -\frac{1}{R} \left(U_G(0) + U_L(0) e^{-\frac{R}{L}t} \right)$ her.

Die Gesamtspannung $U_G(t)$ wird durch die Spannungsquelle festgelegt und beträgt nach dem Einschalten $U_G(t) = U_0$ und nach dem Ausschalten $U_G(t) = 0$.

In beiden Fällen gilt: $\dot{U}_G(t) = 0$. $U_G(t) + U_R(t) + U_L(t) = 0$ (1)

$$\Rightarrow \frac{U_G(t) + U_R(t) + U_L(t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow \frac{U_G(t)}{dt} + \frac{U_R(t)}{dt} + \frac{U_L(t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow \dot{U}_R(t) + \dot{U}_L(t) = 0 \quad (2)$$

Aus $U_R(t) = RI(t)$ folgt $\dot{U}_R(t) = R\dot{I}(t)$ (3) und mit $U_L(t) = L \frac{I(t)}{dt} = L\dot{I}(t) \Leftrightarrow \dot{I}(t) = \frac{U_L(t)}{L}$

eingesetzt in (3) ergibt sich $\dot{U}_R(t) = R \frac{U_L(t)}{L}$. Eingesetzt in (2):

$$\frac{R}{L}U_L(t) + \dot{U}_L(t) = 0 \quad \text{Eine Lösung dieser Differentialgleichung ist: } U_L(t) = U_L(0)e^{-\frac{R}{L}t}$$

Eingesetzt in (1): $U_G(t) + U_R(t) + U_L(0)e^{-\frac{R}{L}t} = 0 \Leftrightarrow U_R(t) = -U_G(0) - U_L(0)e^{-\frac{R}{L}t}$

Mit $U_R(t) = R \cdot I(t)$ folgt: $I_R(t) \cdot R = -U_G(0) - U_L(0)e^{-\frac{R}{L}t} \Leftrightarrow$

$$I_R(t) = -\frac{1}{R} \left(U_G(0) + U_L(0)e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

1.3 Im folgenden betrachten wir den Einschaltvorgang bei folgender Schaltung:

$$R=50\ \Omega; L=250\ H; U_0=-200\ V$$

Berechne die Stromstärke nach 0,1 s.

$$I(0,1\ s) = -\frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) = \frac{-(-200)\ V}{50\ \Omega} \cdot \left(1 - e^{-\frac{50\ \Omega}{250\ H} \cdot 0,1\ s}\right) = 4 \frac{\Omega \cdot A}{\Omega} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{50} \frac{V A^{-1}}{V s A^{-1} s}}\right) = \mathbf{0,07920531\ A}$$

A: Die Stromstärke beträgt 80 mA.

Berechne die Spannung über der Spule nach 0,1 s.

$$U_L(0,1\ s) = -U_0 e^{-\frac{R}{L}t} = U_L(0,1\ s) = -(-200)\ V e^{-\frac{50\ \Omega}{250\ H} \cdot 0,1\ s} = 200\ V \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{50} \frac{V A^{-1}}{V s A^{-1} s}}\right) = 196,04\ V$$

A: Die Spannung beträgt 196 V.

Berechne die Zeit nach Beginn des Einschaltvorgangs, nach welcher $U_L=150\ V$ und $U_R=50\ V$ ist.

Berechnung sowohl über U_L als auch über U_R möglich. Hier:

$$U_L(t_1) = -U_0 e^{-\frac{R}{L}t_1} \Leftrightarrow 150\ V = -(-200)\ V e^{-\frac{50\ \Omega}{250\ H} \cdot t_1} \Leftrightarrow \frac{3}{4} = e^{-\frac{1}{5} s^{-1} \cdot t_1} \Leftrightarrow \ln\left(\frac{3}{4}\right) = -\frac{1}{5} s^{-1} \cdot t_1$$

$$\Leftrightarrow -5 \cdot \ln\left(\frac{3}{4}\right) s = t_1 \Leftrightarrow \mathbf{t_1 = 1,43841\ s}$$

A: Nach 1,44 s ist beträgt $U_L=150\ V$ und $U_R=50\ V$.

1.4 Betrachten wir eine weitere Schaltung. Wähle die Größen von Spule und Widerstand so, dass beim Ausschaltvorgang nach 0,1 s die Spannungen über Spule und Widerstand gleich groß sind.

$$U_L(t) = U_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad U_R(t) = U_G(t) - U_L(t) = -U_L(t)$$

Es gilt also $U_R(t) = -U_L(t) \ \forall t$, unabhängig von den Kenngrößen.

A: Die Größen für Spule und Widerstand sind beliebig.