

Liebe Schüler*innen des Ph-11-Kurses!

Auf der nächsten Seite erhaltet ihr die Theorie für die Woche bis zum 27.3.20 einschließlich der Übungsaufgaben dazu.

In der nächsten Woche starten wir mit einem neuen Thema!

Berichtigung: Die Nummerierung der Theorie der letzten Woche sollte 4.6.3 statt 4.5.3 sein.

Frohes Schaffen und bleibt gesund!

(Bei Fragen: michael.ferstl@willibald-gymnasium.de)

Verbesserung der ÜA zu 4.6.3

Aufgabe 2: Fokus S. 59/6

Geg.: Feldspule mit $N_F = 800$, $\ell_F = 50\text{cm}$, Induktionsspule $N_{\text{ind}} = 300$, $d = 4,5\text{cm}$

a) $t \in [5\text{ms}; 8\text{ms}]$: Das Netzgerät muss zusätzlich zum ohmschen Widerstand den induktiven Widerstand (=durch die entgegengesetzt gerichtete Induktionsspannung) überwinden.

Es gilt $U_{\text{ind}} = -L \cdot \dot{I}$ (Lenzsche Regel).

Die zusätzliche Arbeit liefert die Energie für den Aufbau des magnetischen Feldes.

b) Ges.: $\Phi(t_i)$

$$\begin{aligned}\text{Lös: } \Phi(t) &= A \cdot B(t) = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot \frac{\mu_0 \cdot N_F}{\ell_F} \cdot I(t) = (0,0225\text{m})^2 \cdot \pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{800}{0,5\text{m}} \cdot I(t) = \\ &= 3,198 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot I(t)\end{aligned}$$

$$\Phi(5\text{ms}) = 0, \text{ da } I(5\text{ms}) = 0$$

$$\Phi(10\text{ms}) = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{Vs}, \text{ da } I(10\text{ms}) = 2,0\text{A}$$

$$\Phi(14\text{ms}) = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{Vs}, \text{ da } I(14\text{ms}) = 0,5\text{A}$$

$$\Phi(17\text{ms}) = 0, \text{ da } I(17\text{ms}) = 0$$

c) Ges.: $U_{\text{ind}}(6,7\text{ms})$

$$\text{Lös: } U_{\text{ind}}(t) = -N_{\text{ind}} \cdot \dot{\Phi} = -N_{\text{ind}} \cdot 3,198 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \dot{I}(t)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{2,0\text{A}}{3\text{ms}} \text{ (Steigungsdreieck im Intervall, das } t = 6,7\text{ms} \text{ enthält)}$$

$$U_{\text{ind}}(6,7\text{ms}) = -300 \cdot 3,198 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{2,0\text{A}}{3\text{ms}} = -0,64 \text{ V}$$

$$\text{d) } t \in [5\text{ms}; 8\text{ms}]: \frac{dI}{dt} = \frac{2,0\text{A}}{3\text{ms}} = 667 \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

$$t \in [12\text{ms}; 16\text{ms}]: \frac{dI}{dt} = \frac{-3,0\text{A}}{4\text{ms}} = -750 \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

$$t \in [16\text{ms}; 17\text{ms}]: \frac{dI}{dt} = \frac{1,0\text{A}}{1\text{ms}} = 1000 \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

also U_{ind} im Zeitintervall $t \in [16\text{ms}; 17\text{ms}]$ maximal

Aufgabe 3: Elektrozaun

Gehen wir einmal davon aus, dass die Kuh gerade am Leitermaterial des Zaun schleckt und so einen über die Erde laufenden, Parallelzweig zum Spulenzweig darstellt, der einen hohen Widerstand R_{Kuh} hat. Die Spannung U_0 des Weidezaungeräts wird z. B. von einer 12V-Autobatterie geliefert.

Beim Schließen des Schalters baut sich in der Spule ein Magnetfeld auf, bis die Stromstärke durch die Spule konstant ist ($I_0 = \frac{U_0}{R_{Spule}}$).

An der Kuh liegt in dieser Zeit die konstante Spannung U an, also fließt über die Kuh eine konstante Stromstärke $I_{Kuh} = \frac{U_0}{R_{Kuh}}$, die wegen des großen Widerstands R_{Kuh} aber klein ist.

Beim Öffnen des Schalters wird in der Spule nach der Regel von Lenz eine Induktionsspannung induziert, um die Stromstärke I_0 aufrechterhalten. Die Induktionsspannung ist hoch, da nun der Widerstand $R = R_{Kuh} + R_{Spule}$ groß ist. Also liegt jetzt an der Kuh eine hohe Induktionsspannung an und I_{Kuh} ist im Vergleich zu vorher deutlich größer. Die Kuh erhält so einen kräftigen elektrischen Schlag.

Bemerkung:

Da U_{ind} und damit I_{Kuh} aber sehr schnell abfallen (im Millisekundenbereich), ist die Stromstärke für Mensch und Tier zwar unangenehm, aber ungefährlich.

Ergänzung:

Im Moment des Abschaltens muss die Induktionsspannung so groß sein, dass sie auch im jetzt höherohmigen Stromkreis mit Widerstand $R = R_{Spule} + R_{Kuh}$ die Stromstärke I_0 bewirkt (Die Stromstärkefunktion muss stetig sein, kann also keine Sprungstelle haben).

Der Anfangswert der Induktionsspannung beträgt also $U_{ind} = I_0 \cdot (R_{Spule} + R_{Kuh})$.

Bleiben wir gleich noch einmal beim Elektrozaun: Die Tatsache, dass auch nach dem Abtrennen der Batterie noch Strom fließt, zeigt, dass im magnetischen Feld der Induktionsspule Energie gespeichert sein muss.

Mit dieser Energie werden nach dem Ausschalten Ladungen voneinander getrennt und so eine Induktionsspannung erzeugt. Ist ein geschlossener Stromkreis vorhanden, z. B. über einen Widerstand R_{Kuh} , wird die Magnetfeldenergie gleichzeitig durch elektrische Arbeit in thermische Energie umgewandelt.

Ist kein geschlossener Stromkreis vorhanden ($R \rightarrow \infty$), wird die Energie des Magnetfelds praktisch nur zur Ladungstrennung verwendet (\rightarrow Spannungsspitzen), die aber nur kurz aufrechterhalten werden kann. Bei der Ladungstrennung und beim anschließenden Ladungsausgleich wird wiederum durch elektrische Arbeit die vorhandene Energie in thermische Energie umgewandelt.

4.6.4 Energie des magnetischen Feldes

Die Energie des Magnetfelds einer vom Strom I durchflossenen Spule der Induktivität L beträgt

$$E_{mag} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

(Herleitung für geneigte Leser vgl. Metzger S. 90)

Man beachte die Ähnlichkeit zur Formel für die Energie des elektrischen Feldes:

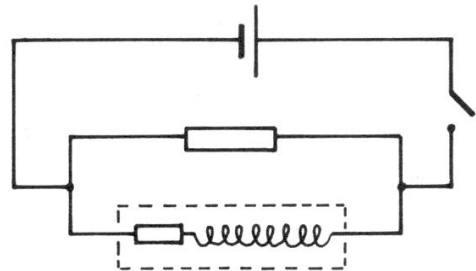
$$E_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

Übungsaufgaben:

Aufgabe 1: Metzger S. 91 / 1

Aufgabe 2:

Eine Induktionsspule mit der Induktivität $L = 630 \text{ H}$ und dem Widerstand $R_i = 280 \text{ } \Omega$ (gestrichelt gezeichnet) wird parallel zu einem ohmschen Widerstand $R' = 320 \text{ } \Omega$ an eine Stromquelle der Spannung $U = 21 \text{ V}$ angeschlossen.

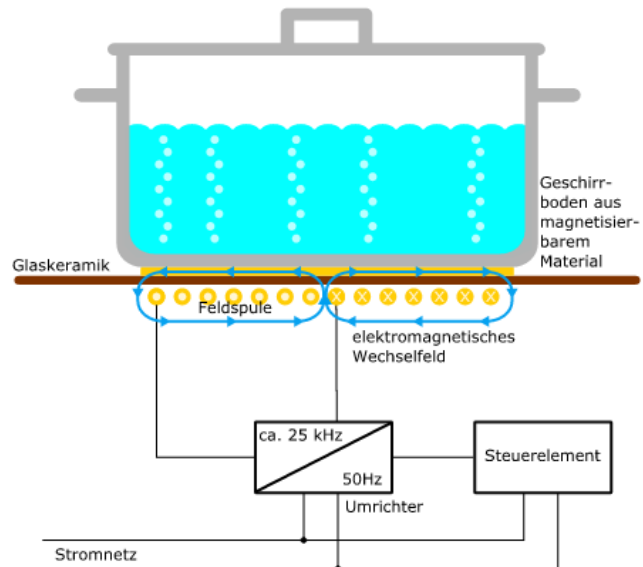


- Berechne den Energieinhalt der Spule.
- Ermittle die Größe der Induktionsspannung im Moment des Abschaltens!
- Gib die Stärke des Stromes nach dem Abschalten in Abhängigkeit von der Zeit an (Abschalten bei $t = 0$).
- Nach welcher Zeit τ ist $I(t)$ auf den Wert $\frac{I_0}{e}$ gefallen?

4. 7 Das Induktionskochfeld – eine technische Anwendung

Moderne Herde besitzen keine Metallkochplatten mehr, sondern haben eine Glaskeramikplatte (Ceranfeld), unter der die Heizwicklungen liegen. Ein Induktionsherd sieht auf den ersten Blick genauso aus. Aber der Unterschied zeigt sich, sobald man die Kochzonen der Glaskeramikplatte einschaltet: Wenn kein Kochtopf auf der Zone steht erwärmt sich zunächst überhaupt nichts. Erst wenn man z.B. einen wassergefüllten Stahltopf auf die Kochzone stellt, dann erwärmt sich dieser schneller als bei den herkömmlichen Herden.

Bei dem neuen Herdtyp das physikalische Phänomen der Induktion: Unter der Glaskeramik befindet sich eine Induktionsspule, die von einem sehr hochfrequenten Strom durchflossen wird. Dieser Wechselstrom verursacht ein sich schnell änderndes Magnetfeld, das auch den metallischen Boden des Topfes durchsetzt. Das magnetische Wechselfeld verursacht im Topfboden eine elektrische Spannung und diese wiederum einen Induktionsstrom (Wirbelstrom). Dieser Strom erwärmt den Boden sehr schnell und schließlich kommt es auch zur Erwärmung des Kochgutes (natürlich kommt es jetzt auch zur Erwärmung der Keramikplatte durch den Topfboden).



Wirbelströme im Geschirrboden erhitzen den Boden. Die Feldspule wird umgangssprachlich oft als Induktionsspule bezeichnet.

Aufgrund der hohen Frequenz des Wechselfeldes dringt dieses nur etwa 0,1 mm in den Topfboden ein (Skinneffekt). Im Prinzip breitet sich das magnetische Wechselfeld der Induktionsspule in gleichem Maße nach oben in Richtung Topf (erwünscht) und unten in Richtung Herd (unerwünscht) aus. Wählt man als Topfboden ein ferromagnetisches Material (also z.B. Stahl und nicht Kupfer oder Aluminium), so ist die Magnetfeldabstrahlung nicht mehr nach oben und unten symmetrisch, sondern nach oben hin verzerrt.

Vorteile des Induktionsherds:

Man kann Energie sparen (ca. 10% gegenüber dem herkömmlichen Herd).

Die Erwärmung (Ankochzeit) ist deutlich kürzer. Es müssen nicht zuerst die Kochplatten und Heizwendeln erwärmt werden.

Da die Keramikplatte nicht allzu heiß wird, brennt verschüttetes Kochgut nicht so stark ein.

Der Induktionsherd reagiert auf Einstellungsänderungen ähnlich schnell wie ein Gasherd.

Nicht verpflichtend:

Versucht Euch an dieser Abituraufgabe des Jahres 2017.

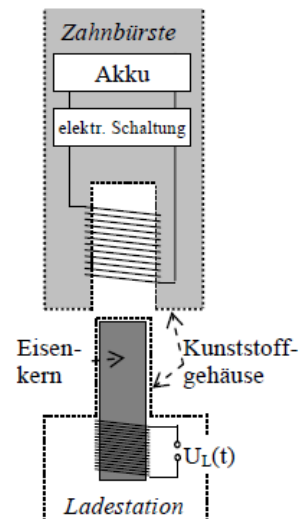
Wichtig: Die Teilaufgabe e) könnt ihr noch nicht lösen, also weglassen!

Diese Aufgabe findet ihr (samt Lösungsvorschlag) auch auf

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-induktion/aufgabe/elektrische-zahnbuerste-abitur-2017-ph11-a2-2>

2. Elektrische Zahnbürste

Im Rahmen einer W-Seminar-Arbeit wird das Funktionsprinzip einer elektrischen Zahnbürste untersucht. Deren Ladestation besteht im Wesentlichen aus einer Spule mit Eisenkern, an die eine Wechselspannung U_L angelegt wird. Dadurch wird im Eisenkern ein magnetisches Wechselfeld B der Frequenz f erzeugt, das näherungsweise durch $B(t) = B_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$ beschrieben wird. Stellt man die Zahnbürste auf die Ladestation, so wird die in der Zahnbürste eingebaute Spule auf den Eisenkern gesteckt. Diese Sekundärspule ist über eine elektrische Schaltung mit einem Akku verbunden.



- 5 a) Erläutern Sie, dass in der Sekundärspule eine Spannung induziert wird. Gehen Sie dabei auch kurz auf die Funktion des Eisenkerns ein.

In der Ladestation wird die Frequenz von 50 Hz (Haushaltsnetz) auf die Frequenz $f = 24 \text{ kHz}$ erhöht. Der Scheitelwert der Flussdichte beträgt $B_0 = 1,5 \text{ mT}$. Die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche der Sekundärspule (Windungszahl N) beträgt $A = 0,80 \text{ cm}^2$.

- 5 b) Zeigen Sie, dass für die in der Sekundärspule induzierte Spannung gilt:

$$U(t) = N \cdot B_0 \cdot A \cdot 2\pi f \cdot \sin(2\pi f \cdot t).$$

Im Weiteren soll der Scheitelwert der induzierten Spannung 1,7 V betragen.

- 3 c) Berechnen Sie die nötige Windungszahl N .

- 5 d) Untersuchen Sie, ob man die Sekundärspule in der Praxis so modifizieren kann, dass die Zahnbürste direkt mit der Netzfrequenz 50 Hz geladen werden kann. Nehmen Sie an, dass sich der Scheitelwert B_0 nicht verändert.

In der Seminararbeit soll auch untersucht werden, ob als Energiespeicher der Akku durch einen Kondensator der Kapazität 10 F ersetzt werden kann. Dazu wird die Zahnbürste gegen eine selbstgewickelte Spule ausgetauscht, an deren Enden der Kondensator angeschlossen wird.

- 5 e) Der Schüler stellt fest, dass der Kondensator mithilfe dieser Anordnung nicht geladen wird. Erklären Sie diese Beobachtung und beschreiben Sie daran anknüpfend eine Funktion der in der Zahnbürste eingebauten elektrischen Schaltung.

- 2 f) Berechnen Sie den Energieinhalt des Kondensators, wenn dieser mit einer konstanten Spannung von 1,7 V geladen ist. [zur Kontrolle: 14 J]

- 4 g) Für den Betrieb der Zahnbürste ist ein Elektromotor mit der mittleren Leistung 1,1 W eingebaut. Begründen Sie, dass der Kondensator aus Teilaufgabe 2f als Ersatz für den Akku nicht geeignet ist.