

Abi 2004, Aufgabe II

- Die Polung der sich ergebenden Induktionsspannung bekommt man mit der 3-Finger-Regel. Die Grundidee ist für die Induktion dieselbe wie für den Halleffekt : es tritt eine Lorentzkraft auf, die zu einer Ladungstrennung führt, eine elektrische Feldkraft wirkt entgegen, und es ergibt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen Lorentzkraft und der elektrischen Feldkraft.
(der einzige Unterschied besteht darin, was zur Bewegung der Elektronen führt).
Man erhält also $U_{\text{ind}} = n \cdot v \cdot d \cdot B$. (d ist hier die gesamte Grundlänge, in der die Induktion erfolgt, also die Strecke von 4,0 cm multipliziert mit der Zahl der Windungen n !)
Setzt man die Werte für B, d, n und v ein, so müssen sich die genannten 36 mV ergeben.
- Die Spule fällt zunächst beschleunigt $y = 1/2 \cdot g \cdot t^2$. Man kann damit berechnen, wie lange es dauert, bis die Spule das Magnetfeld erreicht (0,1 s). Während dieser Zeit ist die Induktionsspannung 0. Es tritt nun so lange Induktion auf, bis sich die vom Magnetfeld durchsetzte Spulenfläche nicht mehr ändert, bis also die Spule ganz im Feld ist (0,15 s).

Da zwischen A und B keine leitende Verbindung besteht ("hochohmiges Spannungsmessgerät") gibt es auch keine nach oben wirkende Bremskraft, die Spule fällt die ganze Zeit beschleunigt weiter. Es gilt dabei $v = g \cdot t$.
Man kann damit die Geschwindigkeiten bestimmen, welche die Spule in dem Augenblick hat, in dem sie das Feld erreicht, und auch ihre Geschwindigkeit in dem Augenblick, wenn sie ganz im Feld ist. Damit bekommt man die Spannungswerte zu diesen Zeitpunkten (1,8 V bzw. 2,6 V).
Da die Geschwindigkeit linear anwächst, wächst auch die Induktionsspannung zwischen 0,1s und 0,15 s linear an.

Ist die Spule ganz im Feld tritt keine Induktionsspannung mehr auf.

Abi 2005, Aufgabe III

Stromstärke in der langgestreckten Spule.

Für die magnetische Flussdichte, die eine langgestreckte Spule erzeugt, gilt:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot \frac{n}{l}$$

Die magnetische Feldkonstante μ_0 ist gegeben, die Permeabilitätszahl μ_r ist bei einer luftgefüllten Spule praktisch 1, Windungszahl n, Länge l und Flussdichte B sind gegeben. Man kann die Gleichung nach der Stromstärke I auflösen und die Werte einsetzen. Das Ergebnis ist etwa 250 mA.

Polung der Abschlüsse.

Die Polung findet man einfach nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum und der *Drei-Finger-Regel der linken Hand* heraus. Nimmt man an, bei P sei der Minuspol der Quelle, so bewegen sich die Elektronen im linken Leiterteil von oben nach unten, im (entscheidenden) unteren Leiterteil von links nach rechts. Der Daumen zeigt hier dann also nach rechts. Der Zeigefinger (steht für die Richtung des Magnetfeldes) zeigt in die Zeichenebene hinein, der Mittelfinger, der die Richtung der Lorentzkraft anzeigt, weist also nach unten. Die Annahme war also richtig. P muss am Minuspol, Q am Pluspol der Quelle angeschlossen werden.

Gesamte nach unten wirkende Kraft.

Die gesamte nach unten wirkende Kraft setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

- der Gewichtskraft, die auf das Rähmchen auch ohne Magnetfeld und Stromstärke in der Spule wirkt
- der magnetischen Feldkraft

Die Gewichtskraft ist einfach $F_G = m \cdot g$, was etwa 0,373 N ergibt.

Die Größe der magnetischen Feldkraft hängt von der Stromstärke im Rähmchen (750 mA), der magnetischen Flussdichte B, der Windungszahl des Rähmchen n_p (500) und der Grundlänge d ab.

Dabei gilt : $F_{\text{magn}} = I \cdot B \cdot n_p \cdot d$

Setzt man die bekannten Werte ein (0,75 A ; $4,2 \cdot 10^{-3} \text{T}$; 500 ; 0,05 m) so erhält man für die magnetische Kraft 0,079 N.

Die gesamte nach unten wirkende Kraft ist also $F_{\text{ges}} = F_G + F_{\text{magn}} = 0,373 \text{ N} + 0,079 \text{ N} = 0,45 \text{ N}$.

Abi 2006, Aufgabe I

Maximale Flussdichte

Die maximale Flussdichte ergibt sich bei der maximalen Stromstärke (0,8 A). Für eine langgestreckte Spule gilt:

$$B = \mu_0 \frac{n_f I}{\ell}$$

Setzt man die gegebenen Werte in die Gleichung ein, so bekommt man $B = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

Wann tritt eine Induktionsspannung auf?

Nur wenn sich der magnetische Fluss in der felderzeugenden Spule verändert, kann in der zweiten Spule eine Spannung induziert werden.

Dazu muss sich die Stromstärke I ändern.

Eine Induktionsspannung entsteht also zwischen 0 und 2 s und dann noch einmal zwischen 5 und 9 s.

Zwischen 2 s und 5 s ist die Stromstärke und damit der magnetische Fluss konstant, hier tritt keine Induktionsspannung auf.

Berechnung der Induktionsspannungen

Für die induzierte Spannung gilt: (Spulenindex i - Induktionsspule , f - Feldspule)

$$U_i = -n_i \cdot \dot{\Phi} = -n_i \cdot \dot{B} \cdot A = -n_i \cdot \mu_0 \frac{n_f}{\ell} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot A$$

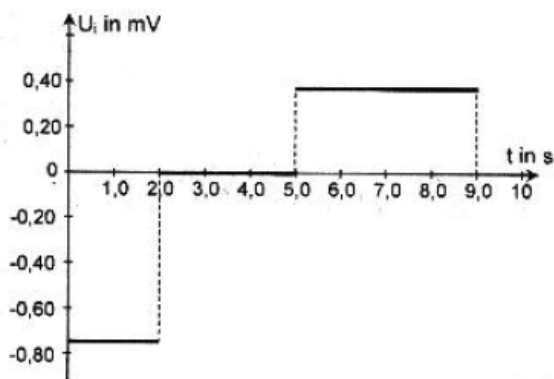
Mit den gegebenen Werten ergibt sich:

0 s - 2 s	-0,76 mV
2 s - 5 s	0 mV
5 s - 9 s	0,38 mV

(NB.: der dritte Zeitabschnitt ist doppelt so lang (4 s) wie der erste Zeitabschnitt (2 s). Delta-t ist damit doppelt so groß, die Induktionsspannung ist daher nur halb so groß.)

Wenn der magnetische Fluss zunimmt, dann ist die Induktionsspannung negativ (Vorzeichen der Induktionsspannung, vgl. lenzsche Regel). Wenn der magnetische Fluss abnimmt ($\Delta\Phi$ negativ), dann ist die Induktionsspannung positiv.

Damit ergibt sich folgendes Diagramm:



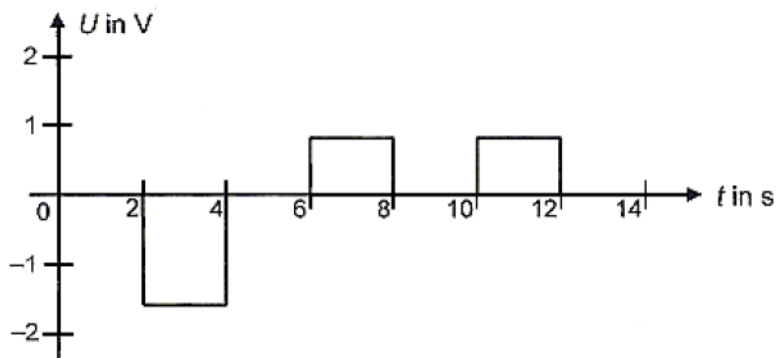
Zustandekommen der Spannung

Zunächst bewegt sich die Spule auf das Magnetfeld zu. Nach einer gewissen Zeit taucht die Spule in das Magnetfeld ein.

Die vom Magnetfeld senkrecht durchsetzte Fläche verändert sich dabei, der magnetische Fluss verändert sich daher auch. Solange die Spule nicht ganz im Magnetfeld ist, sich die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche also ändert, tritt diese Spannung auf.

(Alternativ ist auch eine Erklärung über die Leiterbewegung und die Lorentzkraft möglich)

t-U-Diagramm für die Bewegung der Spule von P nach Q



Erklärung des Diagrammverlaufes und Berechnung der nötigen Größen:

$0 \text{ s} < t < 2 \text{ s}$

Es dauert zwei Sekunden, bis die rechte Spulenseite den linken Rand des Magnetfeldes erreicht. Während dieser Zeit tritt noch keine Induktionsspannung auf.

$2 \text{ s} < t < 4 \text{ s}$

Während dieser zwei Sekunden taucht die Spule ganz in das Feld der Flussdichte B_1 ein (das

Rähmchen ist $0,20 \text{ m}$ lang und bewegt sich mit $0,10 \text{ m/s}$, die Rähmchenfläche ist $0,04 \text{ m}^2$).

Die Induktionsspannung während dieses Zeitraumes ist:

$$U_{\text{ind1}} = -n \cdot \left(\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) = -100 \cdot \left(\frac{0,04 \text{ m}^2}{2 \text{ s}} \right) \cdot 0,8 \text{ T} = -1,6 \text{ V}.$$

$4 \text{ s} < t < 6 \text{ s}$

In dieser Phase ist das Rähmchen ganz im Feld B_1 . Die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche ändert sich nicht, daher tritt in diesem Zeitintervall auch keine Induktionsspannung auf.

$6 \text{ s} < t < 8 \text{ s}$

Das Rähmchen geht in diesen zwei Sekunden vom Feld B_1 in das Feld B_2 über. Da das Magnetfeld B_2 schwächer ist als B_1 , nimmt der magnetische Fluss in der Spule diesmal ab. Die Polung ist also umgekehrt wie zwischen 2 s und 4 s .

Für diesen Abschnitt gilt:

$$U_{\text{ind2}} = -n \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta B}{\Delta t} \right) = -100 \cdot 0,04 \text{ m}^2 \cdot \left(\frac{-0,4 \text{ T}}{2 \text{ s}} \right) = 0,8 \text{ V}.$$

$8 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$

In diesem Zeitraum ist die Spule ganz im Feld B_2 und es gibt keine Induktionsspannung.

$10 \text{ s} < t < 12 \text{ s}$

Nun verlässt die Spule das Feld B_2 . Der magnetische Fluss nimmt noch einmal ab. Es gilt:

$$U_{\text{ind3}} = -n \cdot \left(\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) = -100 \cdot \left(\frac{0,04 \text{ m}^2}{2 \text{ s}} \right) \cdot (-0,4 \text{ T}) = 0,8 \text{ V}.$$

$14 \text{ s} < t < 16 \text{ s}$

Die Spule hat den Feldbereich verlassen, es gibt keine Induktionsspannung mehr.

(Eine an der t-Achse gespiegelte Kurve ist ebenfalls richtig.)

Erzeugung einer Spannung

Wenn sich eine Spule vollständig im Feld befindet, dann kann eine Induktionsspannung nur durch Drehen der Spule oder durch Veränderung der magnetischen Flussdichte erzeugt werden. Beim Drehen hat die Induktionsspannung einen sinusförmigen Verlauf und keinen konstanten Wert. Daher kommt hier nur eine Magnetfeldänderung in Frage (Induktion 2. Art)

Wegen $U_{\text{ind}} = -n \cdot A \cdot (\Delta B / \Delta t) = -100 \cdot 0,04 \text{ m}^2 \cdot (\Delta B / \Delta t) = 1,6 \text{ V}$ muss die Änderung der magnetischen Flussdichte $\Delta B / \Delta t = -0,4 \text{ T / s}$ sein.

Abi 2008, Aufgabe II d

Brauchbarkeit der Diagramme

Das Gewichtsstück fällt und übt dabei über die Umlenkrolle eine konstante Kraft auf den Leiterstab aus. Es tritt eine Induktionsspannung auf, da sich der Leiterstab ja bewegt. Von Reibung wird abgesehen und durch das hochohmige Spannungsmessgerät findet praktisch kein Stromfluss statt.

Für die Induktionsspannung gilt: $U_{\text{ind}} = B \cdot d \cdot v$ (n ist hier 1).

Durch die *konstante* Kraft wirkt auf den Leiterstab eine *konstante* Beschleunigung, d.h. die Geschwindigkeit v und damit die Induktionsspannung U_{ind} muss *linear anwachsen*.

Diagramm 1 scheidet daher aus, da hier die Spannung quadratisch mit der Zeit zunimmt.
Diagramm 3 scheidet aus, weil hier U konstant ist.

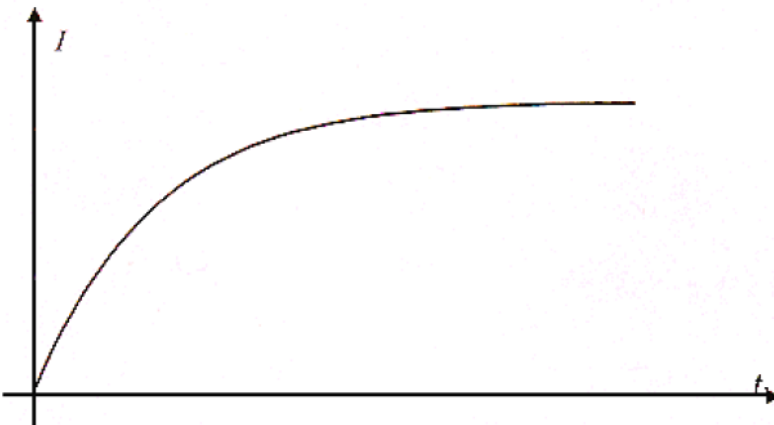
Es bleiben noch Diagramm 2 und Diagramm 4.

Beide Diagramme haben einen linearen Spannungsverlauf und beschreiben daher den Vorgang richtig.

Vielleicht könnte man sich dennoch gegen Diagramm 4 entscheiden, weil hier zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ schon eine Spannung auftritt, also die Stange schon eine Geschwindigkeit hat. Es steht aber nirgends, dass die Stange zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ aus der Ruhe startet. Sie könnte sich also zu diesem Zeitpunkt auch schon bewegen.

Unbewusst geht man wahrscheinlich trotzdem davon aus, dass die Stange auch bei $t = 0 \text{ s}$ aus der Ruhe startet, wie es üblich ist, dann müsste man sich für Diagramm 2 entscheiden. Da der letzte Punkt der Aufgabe d auch mit einer Betrachtung aus der Ruhe beginnt, liegt diese Annahme besonders nahe, sie ist aber nicht zwingend.

Skizzierung des t-I-Diagrammes



Erklärung:

Wenn statt des hochohmigen Spannungsmessgerätes nun ein niederohmiges Stromstärkemessinstrument verwendet wird, ergibt sich diesmal ein *Stromfluss* im Stromkreis aus Spule und Messgerät.

Damit wird die Spule zum stromdurchflossenen Leiter und erfährt eine zweite Lorentzkraft entgegen der Bewegungsrichtung, sie wirkt der Beschleunigung entgegen.

Während des ganzen Vorgangs übt das Gewichtsstück eine beschleunigende Kraft auf den Leiterstab aus. Ohne Stromfluss wäre die Beschleunigung (nach rechts) also die ganze Zeit konstant. Nun nimmt aber die Geschwindigkeit der Stange immer mehr zu, damit vergrößert sich auch die Induktionsspannung.

Die Stromstärke im Stromkreis wächst damit aber auch immer mehr an und die bremsende Kraft nach links wird ebenfalls immer größer.

Irgendwann wird diese Kraft so groß, dass sie der beschleunigenden Kraft des Gewichtsstücks das Kräftegleichgewicht hält.

Ab diesem Augenblick wird der Leiterstab nicht mehr schneller - er hat seine Höchstgeschwindigkeit erreicht. Dann nimmt auch die Induktionsspannung und die Stromstärke nicht mehr zu.

Zum besseren Verständnis: physikalisch ähnliche Vorgänge (nicht Bestandteil der Prüfungsaufgabe)

Ein physikalisches Analogon zu dem Vorgang wäre der *Anfahrvorgang (nach rechts) eines Autos*: Zunächst bewirkt die (als konstant betrachtete) Kraft des Motors eine große Beschleunigung des Fahrzeugs. Diese Kraft entspricht der Kraft des Gewichtsstücks. Je schneller das Fahrzeug aber wird, desto mehr bremst es der Luftwiderstand. Dieser entspricht der (Lorentz-)Gegenkraft des stromdurchflossenen Leiters. Schließlich ist die Luftwiderstandskraft so groß wie die Kraft des Motors. Das Fahrzeug kann nicht weiter beschleunigen, es hat seine Höchstgeschwindigkeit erreicht.

Auch der Freie Fall in Luft wäre ein gleichwertiger Vorgang.

Ein ähnlicher Vorgang ist auch die *Selbstinduktion beim Einschalten einer Spule*. Hierbei ergibt sich durch das Zusammenwirken der Spannungen ein ähnlicher t-I-Verlauf. Die Spannung der äußeren Quelle entspräche dabei der Kraft des Gewichtsstücks, die auftretende Selbstinduktionsspannung der (Lorentz-)Gegenkraft.

Das zeitliche Aufladen eines Kondensators ist ein weiterer Vorgang, der nach ähnlichem Schema abläuft.

Diese Prinzip des Zusammen- und Gegeneinanderwirkens zweier Größen ist also sehr verbreitet.