Elektromagnetische Induktion

ELEKTRIZITÄTSLEHRE

Induktion durch Bewegung

Anstelle eines geraden Leiterstücks soll nun ein rechteckiger Leiterrahmen (Spule mit Windungszahl N = 1) in der skizzierten Weise durch das Magnetfeld bewegt werden. Das Auftreten einer Spannung an den Leiterenden kannst du mit Hilfe der LORENTZ-Kraft verstehen.

Ausgehend von der oben abgeleiteten Formel für die Induktionsspannung soll der in der Animation dargestellte Vorgang unter einem anderen Blickwinkel betrachtet werden:

$$U_{\text{ind}} = -l \cdot v \cdot B = -B \cdot l \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = -B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Bei dieser Herleitung ist das Produkt $l \cdot \Delta x$ die Flächenänderung ΔA des Magnetfeldes, welches von der Spule umfasst wird. Würde anstelle einer einzigen Leiterschleife eine rechteckige Spule mit N Windungen durch das Magnetfeld bewegt, so würden sich die bei jeder Leiterschleife entstehenden Spannungen addieren und es gilt

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Das Entstehen einer Induktionsspannung bei der Bewegung einer Leiterschleife durch ein konstantes, homogenes Magnetfeld kann auch wie folgt gedeutet werden: Ändert sich die Fläche des von einer Spule umschlossenen Magnetfeldes mit der Zeit, so entsteht eine Induktionsspannung:

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Beobachte in der Animation den zeitlichen Verlauf von A_{eff} und gib an, bei welchen Spulenstellungen die zeitliche Änderung von A_{eff} besonders hoch bzw. besonders niedrig ist.

Lösung einblenden

Versuche, A_{eff} durch A_0 und φ auszudrücken.

Lösung einblenden

Weiterführende Artikel

>

Induktion durch Feldänderung

Genauere Untersuchungen zeigen zusätzlich:

- Je größer die Änderung des Magnetfeldes ist (bei gleicher Zeitdauer der Änderung), desto größer ist die Induktionsspannung.
- Je schneller die Änderung des Magnetfeldes ist (bei gleichem Betrag der Änderung), desto größer ist die Induktionsspannung.
- Die Induktionsspannung ist bei fester Feldspule umso größer, je mehr Windungen die Induktionsspule besitzt.
- Besonders hohe Induktionsspannungen erhält man, wenn man Feld- und Induktionsspule auf einen gemeinsamen Eisenkern setzt.

Ändert sich die magnetische Flussdichte eines von einer Spule umschlossenen Magnetfeldes mit der Zeit, so tritt an den Spulenenden eine Induktionsspannung auf, für die gilt:

$$U_i = -N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Weiterführende Artikel

>

Induktionsgesetz

Wie Sie in den vorangegangenen Überlegungen gesehen haben, kann eine Induktionsspannung sowohl bei der Bewegung eines Leiters im Magnetfeld, als auch bei der Magnetfeldänderung in einem ruhenden Leiter auftreten. Durch die Einführung der Größe magnetischer Fluss Φ gelingt es, die beiden gewonnenen Gesetze für die Induktionsspannung zu einem Gesetz zusammen zu führen:

Unter dem magnetischen Fluss Φ versteht man das Skalarprodukt aus dem Vektor der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ und dem Flächenvektor $\vec{A}$ der Leiterschleife bzw. Spule:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$$
$$[\Phi] = 1\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2} \cdot \mathrm{m}^2 = 1\mathrm{Vs}$$

Für Φ kann man auch schreiben: Φ = B·A·cosα. Sind die Vektoren der Flussdichte und der Fläche gleichgerichtet, so ist cosα = 1 und es gilt in diesem Fall Φ = B·A.

Für eine Veranschaulichung kann man sich für die magnetische Flussdichte B die Feldliniendichte vorstellen, für den magnetischen Fluss Φ die Zahl der Feldlinien, die durch eine betrachtete Fläche tritt.

Flussänderung bei konstanter magnetischer Flussdichte B und Flächenänderung:

$$\Delta\Phi = \Phi_e - \Phi_a \quad \Rightarrow \quad \Delta\Phi = B \cdot A_e - B \cdot A_a$$
$$\Delta\Phi = B \cdot (A_e - A_a) \quad \Rightarrow \quad \Delta\Phi = B \cdot \Delta A \quad (1)$$

Flussänderung bei konstanter Fläche und Änderung der magnetischer Flussdichte B:

$$\Delta\Phi = \Phi_e - \Phi_a \quad \Rightarrow \quad \Delta\Phi = A \cdot B_e - A \cdot B_a$$
$$\Delta\Phi = A \cdot (B_e - B_a) \quad \Rightarrow \quad \Delta\Phi = A \cdot \Delta B \quad (2)$$

Induktion durch Bewegung:

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

unter Verwendung von (1) ergibt sich:

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Induktion durch Feldänderung:

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

unter Verwendung von (2) ergibt sich:

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

In der Formulierung des Induktionsgesetzes mit Hilfe des magnetischen Flusses kann man die beiden Spezialfälle "Induktion durch Bewegung" und "Induktion durch Feldänderung" zu einem Gesetz zusammenfassen. Natürlich gibt es auch die Situation bei der sich die Leiterschleife in einem Magnetfeld bewegt und gleichzeitig sich die Flussdichte ändert. Auch dieser Fall ist in der Formulierung des Induktionsgesetzes mit Hilfe des Flussbegriffs enthalten.

Ändert sich der magnetische Fluss Φ durch eine Leiterschleife oder Spule mit der Zeit, so tritt in der Leiterschleife bzw. Spule eine Induktionsspannung U_{ind} auf. Es gilt:

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

N: Windungszahl der Spule; ΔΦ: Änderung des magnetischen Flusses; Δt: Zeitintervall

Hinweise für Experten:

- Bei den betrachteten Beispielen hat sich entweder die Fläche oder das Magnetfeld linear mit der Zeit verändert. Wenn dies nicht mehr der Fall ist, muss man im Induktionsgesetz den Differenzenquotienten ΔΦ/Δt durch den entsprechenden Differentialquotienten dΦ/dt ersetzen:

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Induktionsgesetz in differentieller Form

- Durch Umformung des oben dargestellten Induktionsgesetzes erhält man:

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad \Rightarrow \qquad \underbrace{U_{ind} \cdot \Delta t}_{\text{Spannungsstoß}} = \underbrace{-N \cdot \Delta\Phi}_{\text{Flussänderung}}$$

Hinweis

Die letzte Beziehung gilt nur beim Auftreten einer konstanten Induktionsspannung (d.h. bei zeitlich linearer Flächenänderung, bzw. Flussänderung). Etwas allgemeiner lässt sich unter der Verwendung der Integralrechnung schreiben:

$$\int_{t_1}^{t_2} U_{ind}\, dt = -N \cdot \Delta\Phi$$

Induktionsgesetz in integraler Form

Bei konstanter Induktionsspannung bezeichnet man das Produkt $U_{ind} \cdot \Delta t$, bei nicht konstanter Spannung das Integral $\int_{t_1}^{t_2} U_{ind}\, dt$ als **Spannungsstoß**.

Weiterführende Artikel

>

Regel von LENZ

Heinrich Friedrich Emil LENZ (1804 - 1865), Professor in St. Petersburg führte nach der Entdeckung der Induktion durch FARADAY eine Reihe von wichtigen Versuchen durch. Nach ihm ist die Regel von LENZ (oder LENZsche Regel) benannt, welche eine Vorhersage über die Richtung des Induktionsstroms macht, ohne dass man immer das Experiment bis in alle Details betrachten muss.

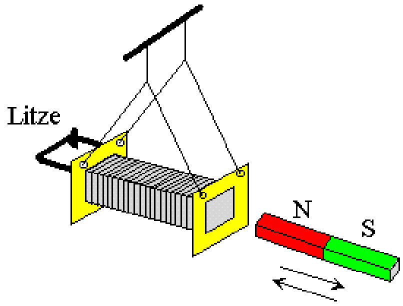
Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er die Ursache seiner Entstehung zu hemmen sucht.

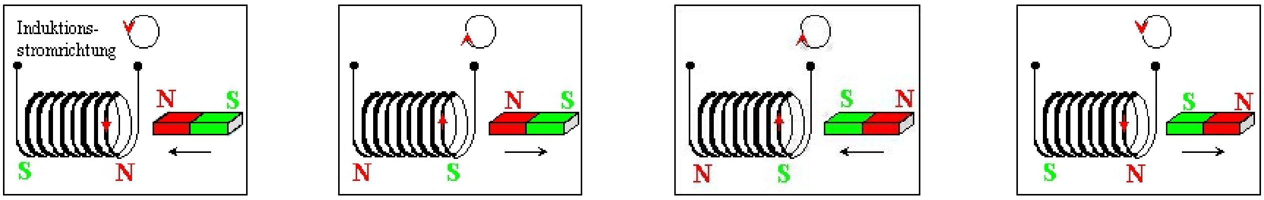
Heinrich Friedrich Emil LENZ
(1804 - 1865)
unbekannter Autor [Public

Mit der Regel von LENZ kann auch die folgende Versuchsserie verstanden werden (Quelle: Staatliche Berufsschule Neu-Ulm):

Versuch
Nähert man einen Magneten einer kurzgeschlossenen und frei aufgehängten Spule, so wird die Spule in Bewegung versetzt.

Erklärung
Infolge der Bewegung des Magneten ändert sich die Stärke des von der Spule umfassten Magnetfeldes, so dass in der Spule eine Induktionsspannung erzeugt wird. Im geschlossenen Leiterkreis (die Spule ist kurzgeschlossen) fließt folglich ein Induktionsstrom, der selbst ein Magnetfeld hervorruft, welches mit dem des Stabmagneten in Wechselwirkung tritt.





Magnet wird auf Spule zubewegt → Spule weicht nach links aus, da sie den ursprünglichen Zustand (Feldfreiheit) aufrechterhalten will. Es fließt in ihr der Induktionsstrom so, dass am rechten Spulenende ein Nordpol entsteht. Auf diese Weise kommt es zur Abstoßung nach links.

Magnet wird von Spule wegbewegt → Spule folgt Magneten, da sie den ursprünglichen Zustand (Feld in Spule) aufrechterhalten will. Es fließt in ihr der Induktionsstrom so, dass am rechten Spulenende ein Südpol entsteht. Auf diese Weise kommt es zur Anziehung nach rechts.

Argumentation analog zur 1. Spalte

Argumentation analog zur 2. Spalte

Weiterführende Artikel

>

Selbstinduktion

Zum Einstieg in das Thema "Induktion durch Änderung des Magnetfeldes" werden meist Anordnungen betrachtet, bei denen die Feldspule (in ihr wird das Magnetfeld verändert) und die Induktionsspule (in ihr wird die induzierte Spannung festgestellt) zwei verschiedene Anordnungen waren. Wie die Experimente zur Selbstinduktion aber zeigen, tritt ein Induktionseffekt beim Ein- und Ausschalten des Stromes in der Feldspule selbst auf. In diesem Fall spricht man von **Selbstinduktion**.

Unter Selbstinduktion versteht man die Induktionswirkung eines Stromes auf seinen eigenen Leiterkreis:

- Ändert sich der durch eine Spule fließende Strom (z.B. beim Ein- und Ausschalten), so bewirkt dieser eine Änderung des magnetischen Flusses durch die "eigene" Spule.
- Aufgrund des Induktionsgesetzes tritt eine Induktionsspannung auf, die nach LENZ die Ursache ihrer Entstehung zu hemmen sucht.
- Dadurch steigt der Strom beim Einschalten einer Spule erst allmählich auf seinen stationären Endwert. Beim Ausschalten der Spule kann der Strom noch "nachfließen", wenn ein entsprechender Stromkreis zur Verfügung steht.

Die folgende Animation zeigt den Verlauf der Batteriespannung $U_{\rm{bat}}$, der an der idealen Spule L anliegenden Spannung $U_{\rm{Lt}}$ (diese ist gegengleich zur induzierten Spannung $U_{\rm{ind}}$ der Spule) und der Spannung $U_{\rm{R}}$ am Widerstand R. Der zeitliche Verlauf von $U_{\rm{R}}(t)$ ist proportional zum Strom $I(t)$ im Kreis.

Einschaltvorgang

- Der Strom geht nicht sofort auf seinen stationären Endwert $I_0 = \frac{U_{\text{bat}}}{R}$, sondern steigt allmählich auf diesen Endwert an.
- Mit dem Stromanstieg ist eine Zunahme des magnetischen Flusses in der Spule verbunden: $\frac{d\Phi}{dt} > 0$.
- Die Flussänderung ruft eine induzierte Spannung U_{ind} hervor, die der von außen angelegten Spannung U_{bat} entgegengerichtet ist (Gesetz von LENZ). Die an der idealen Spule L anliegende Spannung U_{Lt} ist gegengleich zu dieser Induktionsspannung.

Die KIRCHHOFFsche Maschenregel besagt nun (beachte, dass $U_{\text{bat}} < 0$)

$$U_{\text{bat}} + U_L + U_R = 0$$

Da $U_L = -U_{\text{ind}}$ und $U_R = R \cdot I$ gilt, folgt

$$U_{\text{bat}} - U_{\text{ind}} + R \cdot I = 0$$

Für den Strom $I(t)$ im Kreis gilt dann

$$I(t) = \frac{-U_{\text{bat}} + U_{\text{ind}}}{R} = \frac{-U_{\text{bat}} - N \cdot \frac{d\Phi}{dt}}{R}$$

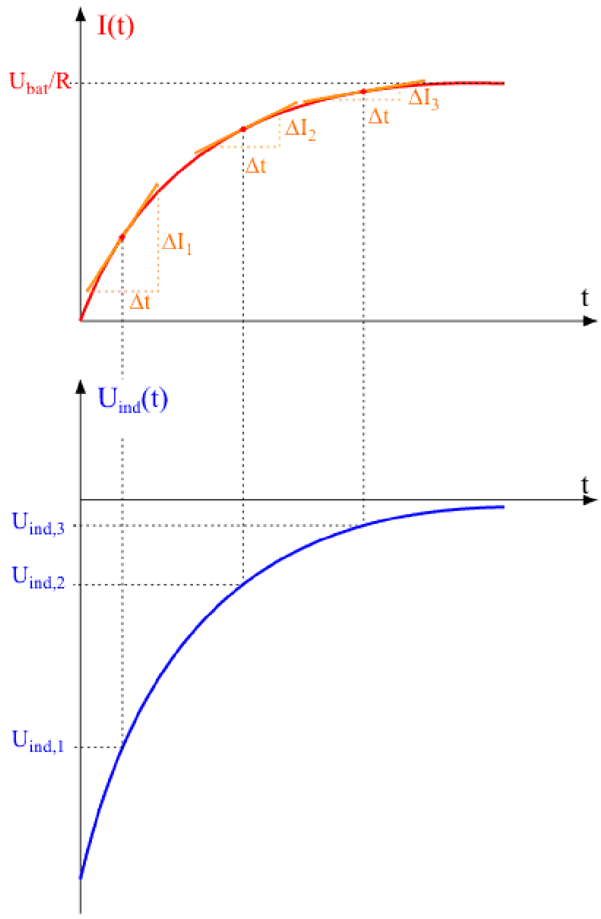
Für die induzierte Spannung U_{ind} gilt

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = -N \cdot A \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

und insbesondere

$$U_{\text{ind}} \sim -\frac{dI}{dt}$$

Dies bedeutet, dass der Betrag der induzierten Spannung proportional zur Steigung der t-I-Kurve ist (vgl. untenstehende Veranschaulichung).



Ausschaltvorgang

- Der Strom geht nicht sofort auf Null zurück, sondern sinkt allmählich auf Null ab.
- Mit dem Stromabfall ist eine Abnahme des magnetischen Flusses in der Spule verbunden: $\frac{d\Phi}{dt} < 0$.
- Die Flussänderung ruft eine induzierte Spannung U_{ind} hervor, die die aufgrund des Induktionsgesetzes in differentieller Form positiv ist.

Für den Strom $I(t)$ im Kreis gilt dann

$$I(t) = \frac{U_{\text{ind}}}{R} = \frac{-N \cdot \frac{d\Phi}{dt}}{R}$$

Für besonders interessierte Schülerinnen und Schüler zeigen wir hier, wie die Funktionsterme für den zeitlichen Verlauf von Strom und induzierter Spannung mit Hilfe von sogenannten **Differentialgleichungen** exakt hergeleitet werden können.

Herleitung einblenden

Die Induktivität L einer luftgefüllten Spule

In Gleichung (1) von oben werden einige Konstanten zu einer neuen Größe, der **Induktivität L** einer luftgefüllten Spule, zusammengefasst:

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot A \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

Mit $L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{A}{l}$ gilt dann

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Für die Einheit der Induktivität L gilt: $[L] = 1\frac{\text{Vs}}{\text{A}} = 1\text{H} \quad (\text{H: Henry})$.

Die Induktivität einer Spule macht eine Aussage darüber, wie hoch der Betrag der Induktionsspannung bei der Spule für eine bestimmte zeitliche Stromänderung ist. Bei einer Spule mit hoher Induktivität tritt bei einer festen zeitlichen Stromänderung ein höherer Betrag der Induktionsspannung auf, als bei einer Spule mit niedrigerer Induktivität.

In Erinnerung an den amerikanischen Physiker **Joseph HENRY (1797 - 1878)**, der sich große Verdienste bei der Erforschung der elektromagnetischen Induktion erwarb, wird die Einheit der Induktivität als 1 Henry bezeichnet.

Joseph HENRY (1797 - 1878) von T. W. Smillie (1843-1917) [Public domain], **via Wikimedia Commons**

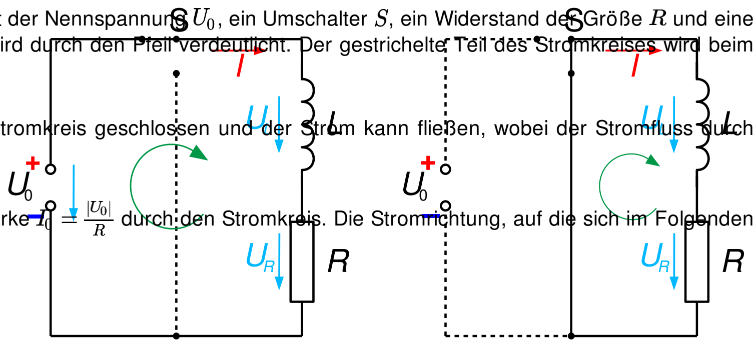
Eine nähere Betrachtung des Ein- und Ausschaltvorganges bei einer Spule kann mit Hilfe von Oszilloskopbildern durchgeführt werden (auch dies ist eher für besonders Interessierte gedacht).

Oszilloskopbilder einblenden

Weiterführende Artikel

>

Ein- und Ausschalten von RL-Kreisen



Im linken Stromkreis befindet sich eine Elektrische Quelle mit der Nennspannung U_0, ein Umschalter S, ein Widerstand der Größe R und eine Spule mit der Induktivität L. Die technische Stromrichtung wird durch den Pfeil verdeutlicht. Der gestrichelte Teil des Stromkreises wird beim Einschalten der Spule noch nicht benötigt.

Durch Umlegen des Umschalters ("Einschalten") wird der Stromkreis geschlossen und der Strom kann fließen, wobei der Stromfluss durch den Widerstand begrenzt wird.

Nach genügend langer Zeit fließt ein Strom mit der Stromstärke $I_0 = \frac{|U_0|}{R}$ durch den Stromkreis. Die Stromrichtung, auf die sich im Folgenden die Darstellung von Stromstärke und Spannungen bezieht, soll nun die gleiche wie beim Einschalten sein, sie wird wieder durch den Pfeil verdeutlicht.

Der rechte Stromkreis unterscheidet sich von dem obigen dadurch, dass der Umschalter S nun umgelegt ist. Dadurch wird die zum Einschalten angeschlossene Elektrische Quelle im gestrichelten Teil des Stromkreises abgetrennt und dafür ein Kurzschluss im Stromkreis hergestellt ("Ausschalten"), so dass der Strom "zusammenbrechen" kann, wobei der Stromfluss wieder durch den Widerstand begrenzt wird.

Die folgende Simulation zeigt den zeitlichen Verlauf von Stromstärke $I(t)$, Spannung $U_R(t)$ über dem Widerstand, Spannung $U_L(t)$ über der Spule, Leistung $P_R(t)$ am Widerstand und Leistung $P_L(t)$ an der Spule sowohl beim Ein- als auch beim Ausschalten. Dabei können der Betrag $|U_0|$ der Nennspannung der Quelle, die Größe R des Widerstands sowie die Induktivität L der Spule in gewissen Grenzen verändert werden.

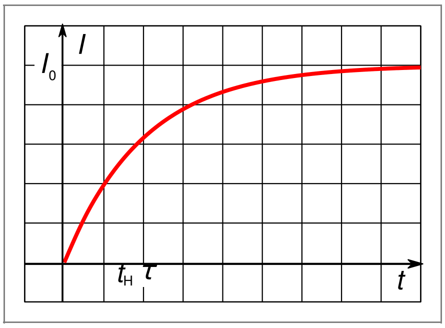
Einschalten des RL-Kreises

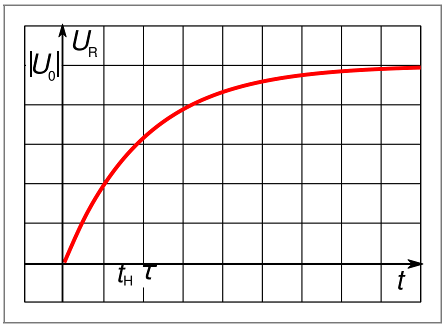
Die Stromstärke $I(t)$ im Stromkreis steigt exponentiell an, der zeitliche Verlauf wird beschrieben durch den Term

$$I(t) = I_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t}\right) \;;\; I_0 = \frac{|U_0|}{R}$$

Nach der Halbwertszeit $t_H = \frac{L}{R} \cdot \ln(2)$ ist I auf 50% von I_0 angestiegen.

Nach der Zeitkonstante $\tau = \frac{L}{R}$ ist I auf ca. 63% von I_0 angestiegen.





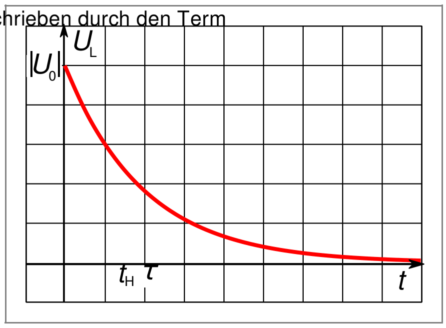
Die Spannung $U_R(t)$ über dem Widerstand steigt exponentiell an, der zeitliche Verlauf wird beschrieben durch den Term

$$U_R(t) = |U_0| \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t}\right)$$

Nach der Halbwertszeit $t_H = \frac{L}{R} \cdot \ln(2)$ ist U_R auf 50% von $|U_0|$ angestiegen.

Nach der Zeitkonstante $\tau = \frac{L}{R}$ ist U_R auf ca. 63% von $|U_0|$ angestiegen.

Die Spannung $U_L(t)$ über der Spule fällt exponentiell ab, der zeitliche Verlauf wird beschrieben durch den Term



$$U_L(t) = |U_0| \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

Nach der Halbwertszeit $t_H = \frac{L}{R} \cdot \ln(2)$ ist U_L auf 50% von $|U_0|$ abgefallen.

Nach der Zeitkonstante $\tau = \frac{L}{R}$ ist U_L auf ca. 37% von $|U_0|$ abgefallen.

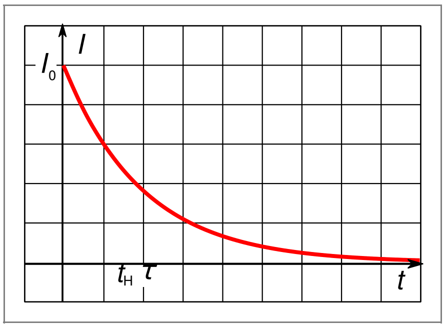
Ausschalten des RL-Kreises

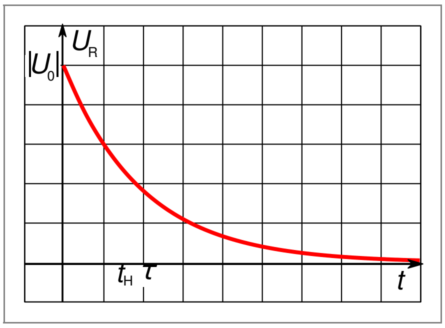
Die Stromstärke $I(t)$ im Stromkreis fällt exponentiell ab, der zeitliche Verlauf wird beschrieben durch den Term

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \;;\; I_0 = \frac{|U_0|}{R}$$

Nach der Halbwertszeit $t_H = \frac{L}{R} \cdot \ln(2)$ ist $|I|$ auf 50% von I_0 abgefallen.

Nach der Zeitkonstante $\tau = \frac{L}{R}$ ist $|I|$ auf ca. 37% von I_0 abgefallen.





Die Spannung U_R über dem Widerstand fällt exponentiell ab, der zeitliche Verlauf wird beschrieben durch den Term

$$U_R(t) = |U_0| \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

Nach der Halbwertszeit $t_H = \frac{L}{R} \cdot \ln(2)$ ist U_R auf 50% von $|U_0|$ abgefallen.

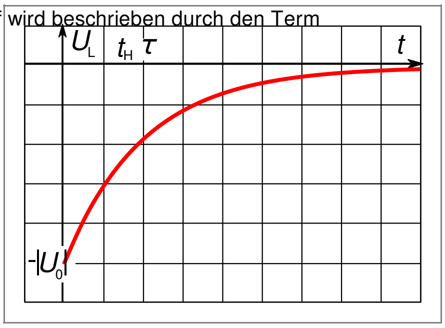
Nach der Zeitkonstante $\tau = \frac{L}{R}$ ist U_R auf ca. 37% von $|U_0|$ abgefallen.

Der Betrag $|U_L|$ der Spannung über der Spule fällt exponentiell ab, der zeitliche Verlauf wird beschrieben durch den Term

$$U_L(t) = -|U_0| \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$$

Nach der Halbwertszeit $t_H = \frac{L}{R} \cdot \ln(2)$ ist $|U_L|$ auf 50% von $|U_0|$ abgefallen.

Nach der Zeitkonstante $\tau = \frac{L}{R}$ ist $|U_L|$ auf ca. 37% von $|U_0|$ abgefallen.

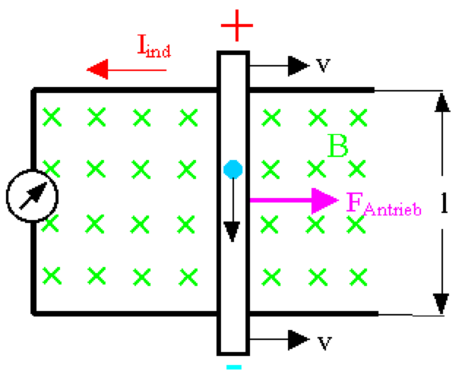
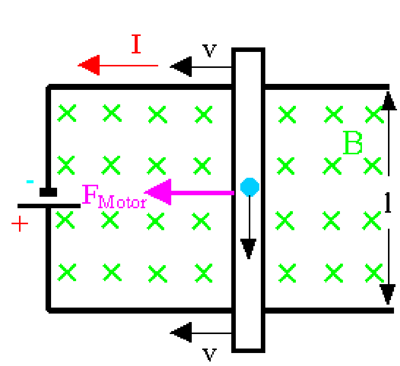
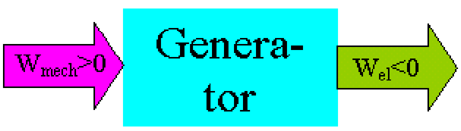


Weiterführende Artikel

>

Generator- und Motorprinzip

Bewegungen von Ladungen quer zur Feldrichtung
⇒ Lorentzkraft

 	
Bewegung des Leiters einschließlich seiner Ladungen ⇒ Kraft auf die Ladungen in Leiterrichtung ⇒ Induktion	Bewegung der Ladungen des Leiters durch eine angelegte Spannung ⇒ Kraft auf den Leiter
 	
Induktionsstrom ⇒ Gegenkraft zur äußeren Kraft nach der Regel von LENZ	Leiterbewegung im Motor ⇒ Gegenspannung durch Induktion ⇒ Leistungsanpassung

Hinweis: Eine positive Arbeit ($W > 0$) bedeutet, dass Energie in das System hineingegeben wird, eine negative Arbeit ($W < 0$) bedeutet, dass Energie aus dem System herauskommt.

>

Wichtiger Hinweis: Dieses Thema ist erst Inhalt in den höheren Jahrgängen.

Bezeichnet man die magnetische Energie der Spule vor dem Abschalten mit $E_{mag,0}$ und mit $E(t)$ die Energie, welche das System Spule nach außen abgibt (hier vornehmlich an die Glühlampe), so gilt aufgrund des Energieerhaltungssatzes für den zeitlichen Verlauf der magnetischen Energie $E_{mag}(t)$:

$$E_{mag}(t) = E_{mag,0} - E(t) \quad (2)$$

Differenziert man die Gleichung (2) nach der Zeit, so folgt:

$$\frac{dE_{mag}(t)}{dt} = -\frac{dE(t)}{dt}$$

Hinweis: Die zeitliche Ableitung der Konstanten $E_{mag,0}$ ist Null.
Die zeitliche Ableitung von $E(t)$ ist aber gerade die elektrische Leistung wie sie in Gleichung (1) dargestellt ist. Somit gilt:

$$\frac{dE_{mag}(t)}{dt} = L\frac{dI(t)}{dt} \cdot I(t) \quad (3)$$

Um die Beziehung für $E_{mag}(t)$ zu erhalten muss man nach einer Funktion suchen, deren zeitliche Ableitung die rechte Seite von Gleichung (3) ergibt. Die folgende Beziehung erfüllt diese Bedingung:

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

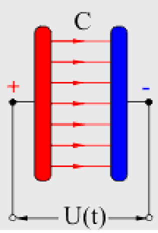
Hinweise:

- An sich wäre dem Ausdruck von $E_{mag}(t)$ noch eine zeitunabhängige Konstante hinzuzufügen. Da aber für $I = 0$ auch $E_{mag}(t) = 0$ gilt, ist der Wert der Konstanten ebenfalls Null.
- Wenn Sie die eingerahmte Lösung überprüfen wollen, müssen Sie diese nach der Zeit differenzieren, um (3) zu erhalten. Beachten Sie hierbei das "Nachdifferenzieren".

Gegenüberstellung von elektrischer Energie eines Kondensators und magnetischer Energie einer Spule

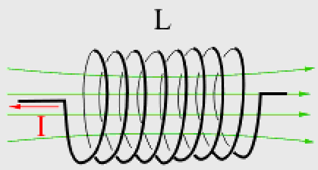
Die elektrische Feldenergie eines Kondensators ist durch dessen Kapazität C und durch das Quadrat der am Kondensator anliegenden Spannung U bestimmt:

$$E_{elektr}(t) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2(t)$$



Die magnetische Feldenergie einer Spule ist durch deren Induktivität L und durch das Quadrat des durch die Spule fließenden Stroms I bestimmt:

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



Weiterführende Artikel

>