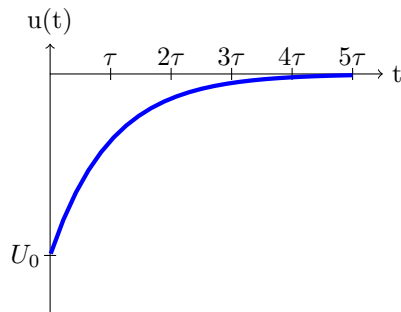


Wie gross ist das Elektrische Feld, auf
Kopfhöhe 2m) unter einer
Hochspannungsleitung?
höhe $h = 10m$, Leitungsdurchmesser $d = 3cm$, $U = 100kV$

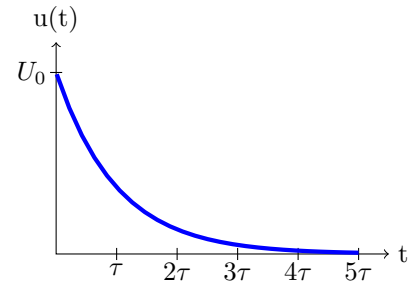
Wie heisst die Gleichung der folgender
Entladefunktion?



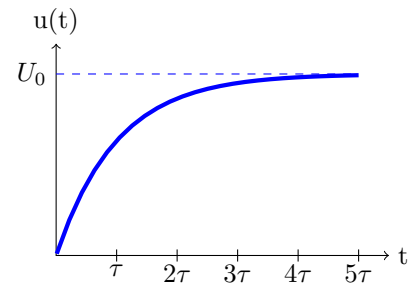
Wie lautet die Differenzialgleichung des
Kondensators und was folgt daraus?

Was ist ein Verschiebungsstrom?

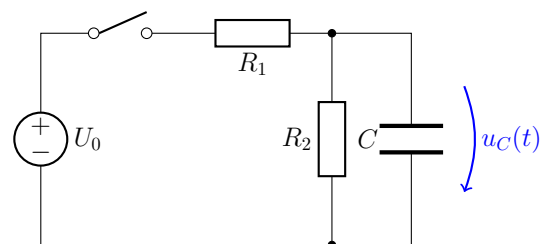
Wie heisst die Gleichung der folgender
Entladefunktion?



Wie heisst die Gleichung der folgender
Ladefunktion?



Wie kann die Spannung $u_C(t)$
berechnet werden wenn zum Zeitpunkt
 t_0 der Schalter geschlossen wird?



Wie lautet das einfache
Induktionsgesetz?

2

Antwort

$$u(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

4

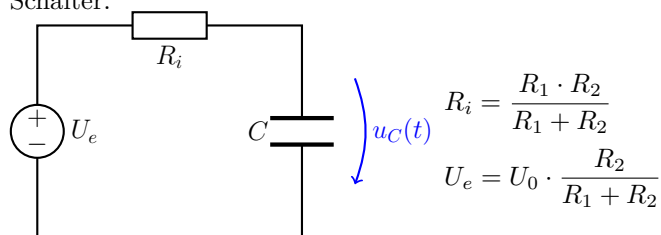
Antwort

$$u(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

6

Antwort

1. Ersatzspannungsquelle berechnen für den geschlossenen Schalter.



2. Spannung u_C berechnen.

$$u_C(t) = U_e \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

8

Antwort

$$u_i(t) = -\frac{d\Phi}{dt}(t)$$

1

Antwort

1. Ladung berechnen:

$$\begin{aligned} U &= \int_{d/2}^h E \cdot dl = \int_{d/2}^h \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r l} \cdot dl \\ &= \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l} \cdot [\ln(r)]_{d/2}^h \\ Q &= \frac{U \cdot 2\pi\epsilon_0 \cdot l}{\ln(2h/d)} \end{aligned}$$

2. In Formel von E einsetzen.

$$\begin{aligned} E &= \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 \cdot r \cdot l} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \cdot r \cdot l} \cdot \frac{U \cdot 2\pi\epsilon_0 \cdot l}{\ln(2h/d)} \\ &= \frac{U}{\ln(2h/d) \cdot r} \Bigg|_{r=8m} = 1.92 \text{ kV/m} \end{aligned}$$

3

Antwort

$$u(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Wobei U_0 negativ ist.

5

Antwort

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{i_C}{C}$$

- Strom durch einen Kondensator bedingt einer Spannungsänderung
- Bei einem grossen Kondensator ($C \gg 0$) führen auch grosse Ströme nur zu relativ kleinen Spannungsänderungen.
- Eine grosse Spannungsänderung an einem Kondensator bedingt einem grossen Strom oder einer kleinen Kapazität

7

Antwort

- Kirchhof ist nicht mehr allgemein gültig. Denn es kann sich nun auch Ladung ansammeln.

$$\oint_{\text{Hülle}} \vec{J} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \sum_n I_n = 0$$

Deshalb muss nun Kirchhof mit dem Verschiebungsstrom erweitert werden:

$$\oint_{\text{Hülle}} \vec{J} \cdot d\vec{s} + \frac{dQ_{\text{eingeschlossen}}}{dt}(t) = 0$$

- Der Verschiebungsstrom verursacht ebenfalls ein Magnetfeld!

Was sind die Primär- und die Sekundäreffekte der Induktion?

Was ist elektromagnetische Induktion?

Was ist Ruheinduktion?

Wie wird im oder vom Magnetfeld Arbeit verrichtet?

Was ist totale Induktion?

Was bedeutet Selbstinduktion und Gegeninduktion?

Wie lautet das Ohmsche Gesetz von Induktivitäten?

Wie lautet der vollständige Durchflutungssatz?

Eine induzierte Spannung durch eine zeitliche Änderung des Magnetfelds.

$$u_i(t) = -\frac{d\Phi}{dt}(t)$$

Ein Sekundäreffekt tritt dann ein, wenn der Stromkreis geschlossen wird. Der fließende Strom verursacht dann ein Gegenfeld.

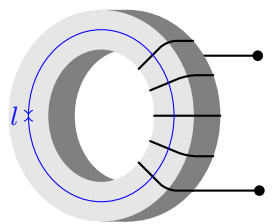
Grundsätzlich wird eine Arbeit verrichtet, wenn etwas gegen eine Kraft bewegt wird.

1. Magnetische Flussänderung bewirkt Wirbel im elektrischen Feld.
2. Der Wirbel im elektrischen Feld kann einen Strom verursachen. Dieser wiederum verursacht Wirbel im Magnetfeld.
3. Die Magnetfelder überlagern sich, wirken einander entgegen.⁴

Unter Selbstinduktion versteht man die Induktionswirkung eines Stromes auf seine eigene Geometrie. Im Gegensatz dazu steht die Gegeninduktivität. Sie wird verursacht durch eine Stromänderung einer anderen Spule.

$$\oint_{C=\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A \left(\vec{J}_{\text{frei}} + \frac{d\vec{D}}{dt} \right) \cdot d\vec{s} \quad \dot{V}_m(t) = \Theta(t) + \frac{d\Psi}{dt}(t)$$

Beispiel: Berechnung der Induktivität einer Ringkernspule


$$\begin{aligned} L &= N \cdot \frac{\Phi}{I} \\ \Phi &= B \cdot A \\ B &= \mu \cdot H \\ H \cdot l &= N \cdot I \rightarrow H = \frac{N \cdot I}{l} \\ B &= \mu \cdot H = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l} \\ \Phi &= B \cdot A = \frac{A \mu \cdot N \cdot I}{l} \\ L &= N \cdot \frac{\Phi}{I} = \frac{A \mu \cdot N^2}{l} \end{aligned}$$

Primäreffekt: Phänomen, dass ein elektrisches Feld (\rightarrow Spannung) entsteht, wenn sich das Magnetfeld ändert.
Sekundäreffekt: Phänomen, welches eintritt, wenn durch die induzierte Spannung ein Strom fließen kann. Dieser Strom verursacht ein Gegenfeld nach Lenz.

Der Primäreffekt tritt immer auf. Der Sekundäreffekt kann nur auftreten, wenn ein Strom fließen kann.

Die zeitliche Änderung des Magnetfelds kommt von aussen. Die Geometrie, in welcher eine Spannung induziert wird, ruht.

Die totale Induktion oder Totalinduktion kann sowohl durch eine Bewegung innerhalb eines Magnetfelds, als auch durch zeitlich veränderliche Magnetfelder entstehen – je nach Sichtweise sind die Effekte schlicht ein und dieselben. Grundsätzlich kann somit gesagt werden, dass die Totalinduktion durch die **Bewegungsinduktion** und die **Ruheinduktion** zusammengesetzt werden kann.

Der zeitlich veränderliche Strom i_L verursacht ein Magnetfeld und damit einen sich ebenfalls zeitlich ändernden magnetischen Fluss $\Phi(t)$. An den Anschlussklemmen entsteht somit die Spannung $u_L(t) = \frac{d\Phi}{dt}(t)$. Daraus folgt dann das Ohmsche Gesetz von Induktivitäten:

$$\frac{di_L}{dt}(t) = \frac{u_L(t)}{L}$$

Wie wird die Induktivität einer Zylinderspule berechnet?

Wie lauteten die Transformatoren Gleichungen?

Welche Verluste können Transformatoren aufweisen?

Wie Verursachen Wirbelströme im Transformator Verluste und wie kann man diese minimieren?

Wie modelliert man einen idealen Übertrager (Transformator)?

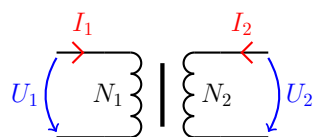
Was unterscheidet ideale und reale Kopplung?

Was sind Hysterese Verluste und wie sind diese zu Erklären?

Wie können die Hystereseverluste im Leerlaufbetrieb gemessen werden?

18

Antwort



Ein Idealer Übertrager zeichnet sich dadurch aus, dass insbesondere die Eingangsleistung gleich gross ist wie die Ausgangsleistung. $P_{in} = P_{out}$

Zudem gelten folgende Gleichungen:

$$I_1 = \frac{I_2}{\ddot{u}}$$

$$U_2 = \frac{U_1}{\ddot{u}}$$

$$U_1 = U_2 \cdot \ddot{u}$$

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2 \cdot \ddot{u}}{I_2} / \ddot{u} = \ddot{u}^2 \cdot R_L$$

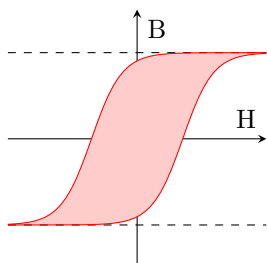
20

Antwort

- Ideale Kopplung:
 $M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$
- Reale Kopplung:
 $M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$
- Der Kopplungsfaktor k kommt von dem Streufeld. Je mehr Streufeld desto kleiner ist k .

22

Antwort



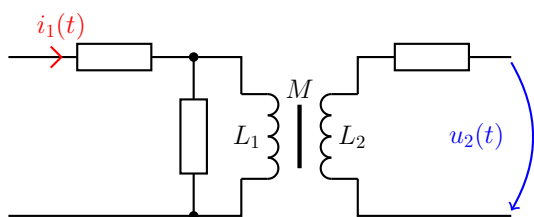
Formel Energiedichte:

$$w_m = \frac{1}{2} \cdot \vec{B} \cdot \vec{H}$$

Beim aufbauen des Magnetfelds muss, dank der Hysterese, mehr Energie aufgewendet werden, als beim abbauen wieder frei gesetzt wird. Dieser Verlust ist proportional zur Fläche, welche durch die Hysteresekurve eingeschlossen wird. Dieser Verlust lässt sich über die Energiedichte berechnen.

24

Antwort



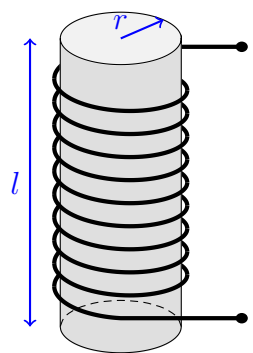
$$H(t) = \frac{N \cdot i_1(t)}{l} \quad \& \quad B(t) = \frac{\int u_2(t) dt}{A}$$

$H(t)$ lässt sich durch den Durchflutungssatz berechnen.
 $B(t)$ lässt sich über die Induzierte Spannung berechnen.

17

Antwort

Das Feld innerhalb einer Zylinderspule kann als Homogen betrachtet werden.



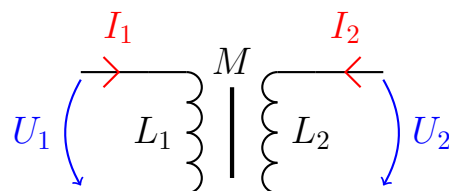
$$\begin{aligned} L &= N \cdot \frac{\Phi}{I} \\ \Phi &= B \cdot A \rightarrow A = r^2 \cdot \pi \\ B &= \mu \cdot H \\ H \cdot l &= N \cdot I \rightarrow H = \frac{N \cdot I}{l} \\ B &= \mu \cdot H = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l} \\ \Phi &= B \cdot A = \frac{A \mu \cdot N \cdot I}{l} \end{aligned}$$

$$L = \frac{A \cdot \mu \cdot N^2}{l}$$

19

Antwort

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$



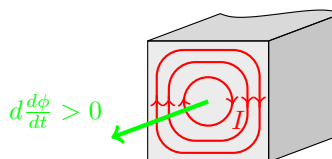
21

Antwort

- Kupferverluste vor allem auf der Seite mit der höheren Anzahl an Windungen und kleineren Leiterquerschnitt.
- Magnetisierungsverluste. (Wegen der Hysterese) Es muss mehr Energie für das Aufbauen des Magnetfelds aufgewendet werden als beim Abbauen wieder frei wird.
- Wirbelströme.

23

Antwort



Ein sich änderndes Magnetfeld (in diesem Fall ist es zunehmend), induziert ein Strom im Eisen. Dieser wiederum verursacht ein Magnetfeld welches der Änderung entgegenwirkt. (gemäss der Lenzschen Regel)

Deshalb wird in einem Transformator meistens ein geschichteter Eisenkern verwendet. Dieser lässt den Wirbelstrom nur in einer dünnen Scheibe fließen. Dadurch ist der Wirbelstrom kleiner und kann somit weniger stark dem Feld entgegen wirken.

Wie äussert sich der Skin-Effekt und von Welchen Parameter hängt er ab?

Was bezeichnet der Poynting Vektor?

Was bedeutet die Polarisierung von elektromagnetischen Wellen?

Was versteht man unter einer ebenen Welle?

Was beschreibt das Poynting-Theorem?

Was besagt die spezielle Relativitätstheorie für die Elektrodynamik?

Was ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen?

Wie lautet das komplexe Signal zur reellen Zeitfunktion
 $u(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \rightarrow \underline{u}(t)$?

Grundsätzlich handelt sich beim Poynting-Theorem um Energieerhaltung mit Leistungsübertragung.

$$\underbrace{-\frac{d}{dt} \int_V (w_e + w_m) dv}_{\text{Zeitliche Änderung der Energie}} = \underbrace{\int_V p dv}_{\text{Leistung}} + \underbrace{\int_{A=\partial V} \vec{S} \cdot d\vec{s}}_{\text{Leistungsübertragung}}$$

Die Zeitliche Änderung der Energie in einem Volumen, sei sie nun zugeführt oder abgeführt worden, muss gleich gross sein wie die Abgegebene Leistung (Wärme, bei zugeführte Leistung bspw. Solarzelle) plus der austretende oder eintretende Leistung des Volumens.

Das elektrische und das magnetische Feld sind verschiedene Wirkungsweisen von demselben Phänomen

Alles kommt auf das Bezugssystem an. Wenn wir uns mit dem Strom mit bewegen sehen wir nur die elektrische Wirkung. Wenn wir uns nicht bewegen, sehen wir die magnetische Wirkung des Stroms.

Wenn wir uns bewegen verhält sich die Zeit anders. Dies wirkt sich bspw. bei der Verkürzung von Längen aus.

Es gibt auch Effekte welche nicht durch die Bewegung beeinflusst werden. z.B. ist die Ladung immer gleich.

$$v_{ph} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$

Somit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum:

$$v_{ph \text{ Vakuum}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = c$$

$$u(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \rightarrow \underline{u}(t)$$

1. \sin in \cos umwandeln:

$$u(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi - \pi/2)$$

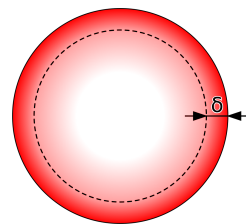
2. Imaginärteil hinzufügen:

$$u(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi - \pi/2) + U_0 \cdot j \cdot \sin(\omega t + \varphi - \pi/2)$$

3. Euler:

$$\underline{u}(t) = \underbrace{U_0 \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{j\varphi}}_{\text{Phasor}} \cdot \underbrace{e^{-j\pi/2}}_{-j}$$

- Je höher die Frequenz, desto weniger Strom fließt der im Innern des Leiters. Und desto grösser wird dadurch der Widerstand, da die effektive Querschnittsfläche kleiner wird



- Die Eindringtiefe (Skin-Tiefe) ist wie folgt definiert:

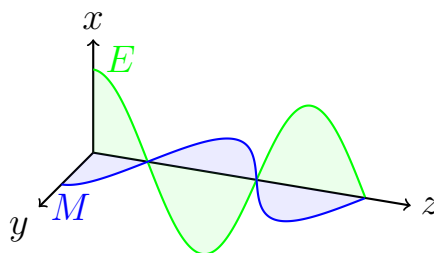
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}}$$

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

Der Poynting Vektor ist die Leistungsdichte einer Fläche und hat somit die Einheit $[S] = \frac{W}{m^2}$.

Der Vektor zeigt in die Richtung der Leistung.

Die Polarisation ist die Richtung des Elektrischen Felds. Die Welle ist x-Polarisiert wenn der E-Feld Vektor in x Richtung zeigt.



Das magnetische Feld und das elektrische Feld stehen senkrecht zueinander und die Welle ist Harmonisch.

Welche Vorteile bringt uns die
komplexe Wechselstromrechnung
gegenüber der reellen
Wechselstromrechnung?

Lineare Netzwerke können durch Multiplikationen gelöst werden anstelle von einer DGL.