

A) Elektromagnetische Wechselwirkung: Wiederholung**a) Induktion**

- 1) Zieht man einen Metallstab durch ein Magnetfeld so laden sich die Enden elektrisch auf.
- 2) Die elektrische Aufladung des Stabes wird durch die Lorentzkraft bewirkt.
- 3) Zwischen den geladenen Stabenden liegt, wie zwischen allen Ladungen, eine Spannung U .
- 4) Man sagt: Zwischen den Stabenden wurde eine Spannung induziert und nennt $U = U_{ind}$.
- 5) Bewegt man den Stab rechtwinklig durch das Magnetfeld, so gilt $U_{ind} = d \cdot v \cdot B$.
- 6) Die Bewegung eines Leiters durch ein Magnetfeld ist das Grundprinzip des Generators.
- 7) Die eigentliche Induktion ist aber noch mehr. Bei ihr entsteht ein elektrisches Ringfeld.
- 8) Neben dem „normalen“ el. Feld mit zwei Polen, liefert die Induktion also noch ein el. Ringfeld.
- 9) Die Feldlinien des el. Ringfeldes sind geschlossene Linien ohne Anfang und ohne Ende.
- 10) Bisher gab es nur beim Magn. geschl. Feldlinien, jetzt treten sie auch in der Elektrizität auf.
- 11) Auch ein elektr. Feld mit geschlossenen Feldlinien setzt elektrische Ladungen in Bewegung.
- 12) Ob die Feldlinien geschlossen sind oder nicht, die Kraftformel lautet immer $F = q \cdot E$.
- 13) Diese Formel zeigt, dass auch el. Felder mit geschlossenen Feldlinien echte el. Felder sind.
- 14) Induktion ist das Entstehen von elektrischen Ringfeldern mit geschlossenen Feldlinien.
- 15) Um die Induktion zu verstehen braucht man den Begriff des magnetischen Flusses Φ (Phi).
- 16) Der magn. Fluss Φ ist ein Produkt aus zwei Faktoren. Φ ist also auf zwei Arten beeinflussbar.
- 17) Der 1. Faktor ist die magnetfelddurchflossene Fläche A in m^2 .
- 18) Der 2. Faktor ist die die Fläche durchströmende magnetische Flussdichte B in $Tesla = N / A \cdot m$.
- 19) Für den magnetischen Fluss Φ durch eine Fläche der Größe A gilt also $\Phi = A \cdot B$.
- 20) Man kann Φ mit der Wassermenge aus einem Gartenschlauch vergleichen:
- 21) Der Gartenschlauch kann einen größeren Durchmesser und größere Fließgeschwindigkeit haben.
- 22) Bei einem quadratischen Rahmen kann man A durch Auseinanderziehen der Seiten vergrößern.
- 23) Zieht man die 4 Seiten durch's Magnf., so verbinden sich die 4 Lorentzkräfte zu einer Ringkraft.
- 24) Division der Ringkraft durch die Probeladung q liefert die Feldst. E des induzierten Ringfeldes.
- 25) Schlitzt man den Rahmen auf, so lässt sich die Spannung U_{ind} des Ringfeldes messen.
- 26) Ein el. Ringfeld wird auch induziert, wenn bei konstantem A die Flussdichte B verändert wird.
- 27) Auch bei Veränderung von B lässt sich am Schlitz eine Induktionsspannung U_{ind} messen.
- 28) Beide Mögl. werden zusammen erfasst, wenn man nach der zeitlichen Änderung von Φ fragt.
- 29) Die zeitliche Änderungsrate entspricht der erste Ableitung bzgl. der Zeit $\dot{\Phi}$.
- 30) Die Produktregel zeigt die beiden Möglichkeiten sehr schön: $\dot{\Phi} = (A \cdot B)' = \dot{A} \cdot B + A \cdot \dot{B}$.
- 31) Induktion heißt, dass im Falle von $\dot{\Phi} \neq 0$ um die Flussänderung herum ein el. Ringfeld entsteht.
- 32) Das elektrische Ringfeld entsteht bei Flussänderung auch im Vakuum ohne Leiterschleife.
- 33) (a) Ohne Leiterschleife erzeugt (induziert) die Flussänderung ein Ringfeld.
- 34) (b) Liegt eine aufgeschlitzte Leiterschleife in dem Bereich, so misst man U_{ind} ohne Stromfluss.
- 35) (c) Ist die Leiterschleife geschlossen, so lässt das Ringfeld einen Ringstrom fließen.
- 36) (d) Der Ringstrom in der geschl. Leiterschleife erzeugt seinerseits ein Magnfeld mit N u. S.
- 37) (e) Der induzierte Ringstr. bzw. das induz. Magnfeld ist dem urspr. Feld entgegen gerichtet.
- 38) (f) Die Lenzsche Regel formuliert das: Der Induktionsstrom wirkt seiner Ursache entgegen.
- 39) Lenzsche Regel: Jede Magnfeldänderung wird durch Induktionsstrom gehemmt, sofern er fließt
- 40) Die Lenzsche Regel kommt nur zum Zuge, wenn eine geschlossene Leiterschleife ausliegt.
- 41) Die Lenzsche Regel basiert auf umgek. Vorz. von $\dot{\Phi}$ und der Orientierung des ind. Ringfeldes.
- 42) Die Lenzschen Regel liefert im Induktionsgesetz ein negatives Vorzeichen: $U_{ind} = -\dot{\Phi}$.
- 43) Ohne das Minus, wäre unser Universum instabil. Neue Energie würde aus dem Nichts entstehen
- 44) Induktion heißt, dass bei Vergr. des magn. Flusses ein neg. orientiertes elektr. Ringfeld entsteht.
- 45) Bei einer Spule mit n Windungen gilt $U_{ind} = -n \cdot \dot{\Phi}$.
- 46) Der freie Fall ist verlangsamt, wenn im Ring oder Rohr durch Ind. ein Ringstrom fließen kann.

b) Selbstinduktion

- 1) Selbstinduktion tritt nur an der geschl. Leiterschleife eines Stromkreises mit Spannung U_N auf.
- 2) Die Spannung U_N lässt nach Ohm in der Leiterschleife einen Ringstrom $I_N = U_N / R$ fließen.
- 3) Der Ringstrom I_N erzeugt ein Magnetfeld mit Fluss Φ und N- u. S-Pol durch die Schleife.
- 4) Sobald U_N vergrößert wird, wird auch $\dot{I}_N > 0$ und der magn. Fluss größer $\dot{\Phi} > 0$.
- 5) Der zunehmende Fluss $\dot{\Phi} > 0$ induziert ein negativ orientiertes elektrisches Ringfeld E_{ind} .
- 6) Das Ringfeld E_{ind} lässt in der geschl. Leiterschleife einen Ringstrom I_{ind} fließen.
- 7) Der induzierte Ringstr. I_{ind} ist dem ursprüngl. Strom I_N entgegengerichtet und schwächt ihn.
- 8) Insgesamt fließt daher ein Strom der Stärke $I = I_N + I_{ind}$ durch die Leiterschleife.
- 9) Es gibt also eine Rückkopplung, denn Φ und $\dot{\Phi}$ folgen dem Strom I den sie selbst erzeugt haben.
- 10) Analog zu 8) addiert sich zur Netzspannung U_N die induzierte Spannung: $U = U_N + U_{ind}$.
- 11) Das Induktionsgesetz für die Spannung lautet $U_{ind} = -\dot{\Phi}$. Dabei ist Φ der tatsächliche Fluss.
- 12) Da $\dot{\Phi}$ durch die Stromänderung \dot{I} zustande kommt, ist U_{ind} prop. zu \dot{I} .
- 13) Der Proportionalitätsfaktor heißt „Selbstinduktivität“ oder vereinfacht „Induktivität“ L .
- 14) Die Maßeinheit von L heißt *Henry*. Es gilt $H = V \cdot s / A$.
- 15) Die Formel $U_{ind} = -\dot{\Phi}$ geht also in die Formel $U_{ind} = -L \cdot \dot{I}$ über.
- 16) Die Induktivität L hängt von Spulenquerschnittsfläche A und Spulenlänge l ab.
- 17) Eine Spule mit n Wdg. vergrößert magn. Fluss Φ und die Abl. $\dot{\Phi}$ um das n -fache.
- 18) Weil $U_{ind} = -n \cdot \dot{\Phi}$, geht n quadratisch in L ein.
- 19) Für die Selbstinduktivität einer langen dünnen Spule gilt $L = \mu_0 \mu_r n^2 A / l$.
- 20) Ohm $U = R \cdot I$ bezieht sich auf die tatsächliche Spannungssumme $U = U_N + U_{ind}$.
- 21) Das Ohmsche Gesetz lautet daher $R \cdot I = U_N + U_{ind}$, bzw. $R \cdot I = U_N - L \cdot \dot{I}$.
- 22) Der Ist-Wert I des Stromes und seine Änderung \dot{I} regelt sich so ein, dass $R \cdot I = U_N - L \cdot \dot{I}$ gilt
- 23) Bei den Ein- und Ausschaltvorgängen verzögert die Induktion den jeweiligen Vorgang.
- 24) Die Ein- und Ausschaltvorgänge folgen e -Funktionen. Die Halbwertzeit beträgt $t_H = L \cdot \ln 2 / R$.
- 25) Zum Widerst. $R = U / I$ u. Kondensator $C = Q / U$ kommt als Drittes die Spule $L = U / \dot{I}$.

c) Ideale Spule

- 1) Die Wickelung einer idealen Spule hat den Widerstandswert $R = 0 \Omega$.
- 2) Die ideale Spule kann also nur durch supraleitendes Material hergestellt werden.
- 3) Auch ohne supraleitendem Material kommt der idealen Spule große Bedeutung zu, denn ...
- 4) eine reale Sp. ist eine Reihensch. aus einer idealer Spule mit $R = 0$ und einem Widerst. mit $L = 0$.
- 5) Die Gl. $R \cdot I = U_N - L \cdot \dot{I}$ geht für die ideale Spule in $0 = U_N - L \cdot \dot{I}$ bzw. $U_N = L \cdot \dot{I}$ über.
- 6) Die Spannung U_N kommt von *außen* an die Spule. Für sie gilt $U_N = + L \cdot \dot{I}$.
- 7) Die Spannung U_{ind} gehört zu Induktion, die *innen* erfolgt. Für sie gilt $U_{ind} = - L \cdot \dot{I}$.
- 8) In komplexen Schaltungen ist nur die von außen angelegte Spannung U_N relevant.
- 9) Nachdem man alles verstanden hat, ersetzt man im weiteren U_N durch U_L .
- 10) Die drei Bauteile der E.-Techn. haben dann die Gl. $U_R = R \cdot I_R$, $Q_C = C \cdot U_C$ und $U_L = L \cdot \dot{I}_L$.
- 11) Die Spannung $U_{ind} = -L \cdot \dot{I}$ tritt des Weiteren nicht mehr auf.
- 12) Die Form $U_L = L \cdot \dot{I}_L$ zeigt, dass die Spannung U_L proportional zur Stromänderung \dot{I}_L ist.
- 13) Aus $\dot{I}_L = U_L / L$ folgt $I_L(t) = (1/L) \cdot \int U_L(t) dt$. So lässt sich $I_L(t)$ aus $U_L(t)$ berechnen.

- 14) Bei konstanter Spannung $U_L = U_0$ ergibt sich ein linear ansteigender Strom $I_L(t) = (U_0 / L) \cdot t$.
- 15) Ist bei $U_L(t) = 0$ ein Anfangsstrom vorhanden, so fließt dieser selbst ohne Spannung weiter.
- 16) Bei einer Sinus-Wechselspannung $U_L(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ folgt $I_L(t) = -(\hat{U} / \omega \cdot L) \cdot \cos(\omega \cdot t)$.
- 17) Transformator

d) Maxwellsche Ergänzung

- 1) löiu
- 2) öjib
- 3)