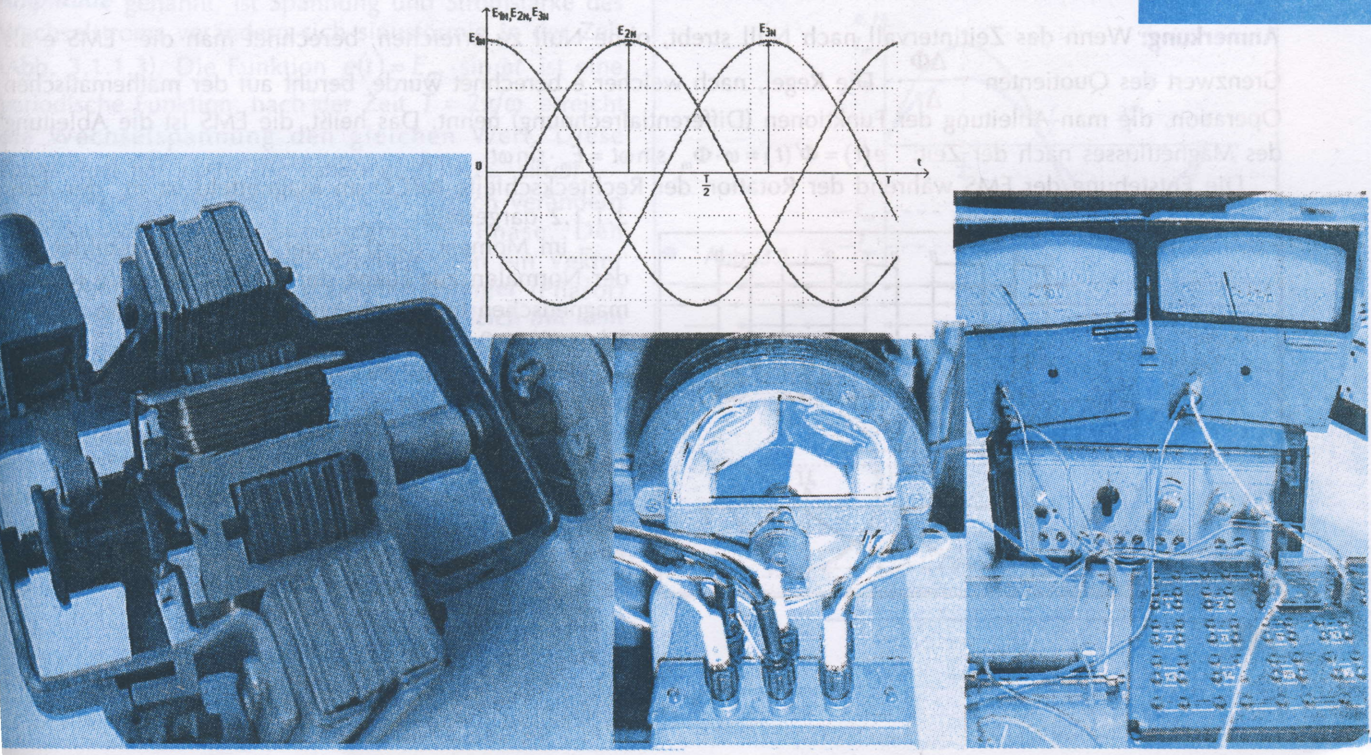
Kapitel 3

Die Erzeugung und die Anwendung des Wechselstroms

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt:



3.1. Der Wechselstrom

3.1.1. Die Erzeugung des Wechselstroms

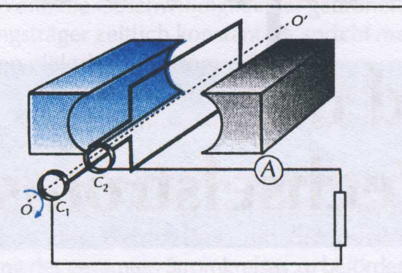


Abb. 3.1.1.1

Die Erzeugung des elektrischen Stromes (Wechselstrom oder Gleichstrom) ist eine der wichtigsten Anwendungen der elektromagnetischen Induktion. Die Bedingung für das Auftreten eines induzierten elektrischen Stromes in einem geschlossenen Stromkreis ist ein veränderlicher Magnetfluss durch die Fläche dieses Stromkreises. Das benötigt entweder die Rotation des Stromkreises, oder des Magnetfeldes. Das Funktionsprinzip der elektrischen Generatoren beruht auf der Rotation einer Schleife um eine Achse, die senkrecht steht auf die Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes.

Wir betrachten eine Rechteckschleife, geformt aus einem leitenden Draht, die sich in einem homogenen Magnetfeld befindet, wie in der Abb. 3.1.1.1. Die Enden der Rechteckschleife sind verbunden mit zwei Kollektorringen C_1 und C_2, die über einen Widerstand an das Amperemeter A geschaltet sind. Wir nehmen eine gleichförmige Drehbewegung dieser Rechteckschleife um die Achse OO' mit der Winkelgeschwindigkeit ω an. Während der Rotation erfolgt eine kontinuierliche Änderung des Winkels α, gebildet von der Normalen $\vec{n}$ zur Ebene der Rechteckschleife und der Induktion $\vec{B}$: $\alpha = \omega \cdot t$. Dementsprechend verändert sich kontinuierlich auch der Magnetfluss durch die Ebene der Rechteckschleife:

$$\Phi(t) = B \cdot S \cdot \cos\omega t\,.$$

Die grafische Darstellung dieser Änderung ist in der Abb. 3.1.1.2 gegeben.

Gemäß dem Gesetz von Faraday $\quad e = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$,

wird in die Schleife eine elektromotorische Spannung induziert. Mit der Formel des (veränderlichen) Magnetflusses von vorher erhalten wir für die induzierte elektromotorische Spannung die Gleichung:

$$e(t) = E_m \cdot \sin\omega t\,,$$

wobei:

- $e(t)$ ist die momentane elektromotorische Spannung (im Moment t);
- $E_m = \omega \cdot \Phi_m$ ist der Höchstwert der Wechselspannung, den man ***Amplitude*** nennt;
- $\omega = 2\pi\nu$ ist die Pulsation der Wechselspannung, wo ν die Frequenz ist;
- $\Phi_m = B \cdot S$ ist der maximale Magnetfluss durch die Schleife, B ist die magnetische Induktion, S ist die Fläche der Rechteckschleife

Anmerkung: Wenn das Zeitintervall nach Null strebt, ohne Null zu erreichen, berechnet man die EMS e als Grenzwert des Quotienten $-\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Die Regel, nach welcher e berechnet wurde, beruht auf der mathematischen Operation, die man Ableitung der Funktionen (Differentialrechnung) nennt. Das heißt, die EMS ist die Ableitung des Magnetflusses nach der Zeit: $e(t) = \Phi'(t) = \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin\omega t = E_m \cdot \sin\omega t$

Die Entstehung der EMS während der Rotation der Rechteckschleife ABCD im Magnetfeld ist in der Abb. 3.1.1.2 dargestellt:

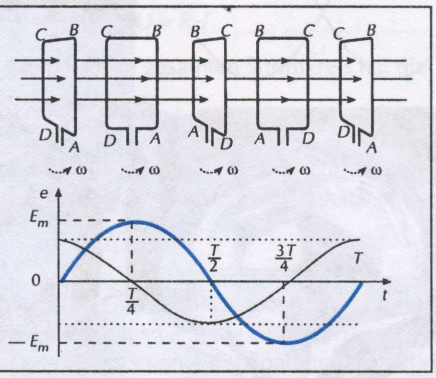


Abb. 3.1.1.2

– im Moment $t = 0$ ist der Winkel α, gebildet von der Normalen zur Ebene der Rechteckschleife mit der magnetischen Induktion gleich 0° und weil sin 0° = 0, folgt $e(0) = 0$;

– im Moment $t = T/4$, ist die Rechteckschleife um 90° gedreht und weil sin 90° = 1, folgt $e(T/4) = E_m$;

– im Moment $t = T/2$ ist die Rechteckschleife um 180° gedreht und weil sin 180° = 0, folgt $e(T/2) = 0$;

– im Moment $t = 3T/4$ ist die Rechteckschleife um 270° gedreht und weil sin 270° = – 1, folgt $e(3T/4) = -E_m$;

– im Moment $t = T$ ist die Rechteckschleife um 360° gedreht und weil sin 360° = 0, folgt $e(T) = 0$.

EXPERIMENT

Das Labormodell des Wechselspannungsgenerators (Abb. AE 3.1.1.1) hat einen Rotor, bestehend aus vier in Reihe geschalteten Spulen. Das Magnetfeld wird von einem Stator erzeugt, der aus einem Elektromagneten besteht: zwei Spulen auf einem U-förmigen Eisenkern und mit 12 V Gleichspannung gespeist. Steckt den Rotor auf den U-förmigen Eisenkern und verbindet seine Bürsten mit einem Amperemeter mit der Null in der Mitte der Skala. Die Bürsten haben Kontakt mit einem zylinderförmigen Teil von der Achse des Rotors- das ist der Kollektor. Legt Spannung an die Spulen des Stators an, dreht den Rotor mit der Hand und verfolgt die Anzeige des Amperemeters.

Schlussfolgerung: Die Bewegung des Zeigers zu beiden Seiten der Null weist auf die Entstehung eines Wechselstroms hin.

Wenn an die Stelle des Ampermeters der Analog-Digital-Wandler eines Computers geschaltet wird, um die in den Spulen entstandene Spannung zu registrieren, erhält man das Ergebnis aus der Abb. AE 3.1.1.2. Das Signal ist stark gedämpft, da die Rotation des Magneten starke Gegenkräfte hervorruft.

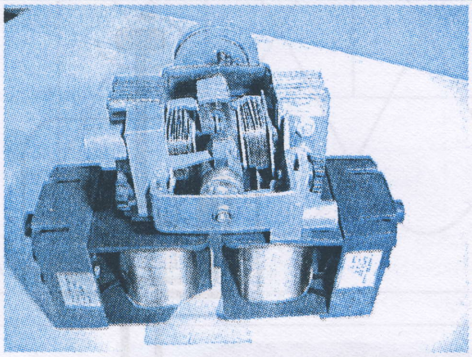


Abb. AE 3.1.1.1

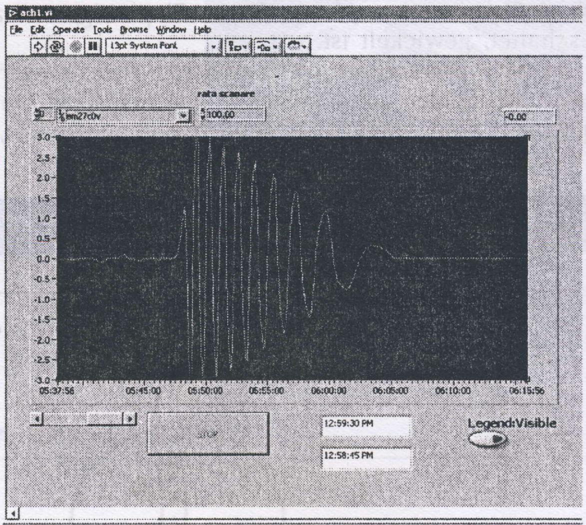


Abb. AE 3.1.1.2

Schlussfolgerung: Die gleichförmige Rotation eines metallischen Rahmens um seine Symmetrieachse in einem homogenen Magnetfeld, das senkrecht auf die Drehachse steht, erzeugt in dem Rahmen eine ***sinusförmige Wechselspannung***.

Wenn der äußere Stromkreis nur einen Widerstand enthält, dann ist der Wert der momentanen Stromstärke des Wechselstroms gegeben durch die Beziehung:

$$i(t) = \frac{e(t)}{R} = I_m \cdot \sin\omega t,$$

wobei $I_m = E_m/R$ der Höchstwert der Stromstärke, ***Amplitude*** genannt, ist Spannung und Stromstärke des Wechselstroms verändern sich sinusförmig in der Zeit (Abb. 3.1.1.3). Die Funktion $e(t) = E_m \cdot \sin\omega t$ ist eine periodische Funktion: nach der Zeit $T = 2\pi/\omega$ erreicht die Wechselspannung den gleichen Wert. Diese Eigenschaft hat auch die Funktion $i(t) = I_m \cdot \sin\omega t$.

So wie aus der Abb. 3.1.1.3 ersichtlich verändern sich Spannung und Stromstärke in Phase. Den sinusförmig veränderlichen Größen kann ein Vektor zugeordnet werden, den man ***Phasenzeiger*** (Phasor) nennt. ***Der Phasenzeiger hat den Modul gleich mit dem Effektivwert der Sinusgröße und bildet mit der Horizontalen einen Winkel gleich mit der Anfangsphase dieser Größe.*** Er rotiert im Gegenzeigersinn mit einer Winkelgeschwindigkeit, die der Änderung der Phase entspricht. Im Phasenzeigerdiagramm unterscheiden sich die Sinusgrößen durch ihren Effektivwert und ihre Anfangsphase.

Das heißt, dass die Phasenzeiger der Spannung und der Stromstärke zusammen rotieren (Abb. 3.1.1.4).

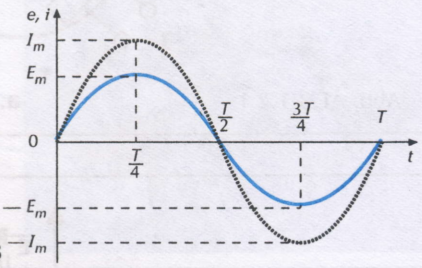


Abb. 3.1.1.3

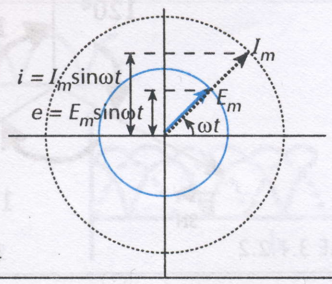


Abb. 3.1.1.4

3.1.2. Der Wechselspannungsgenerator

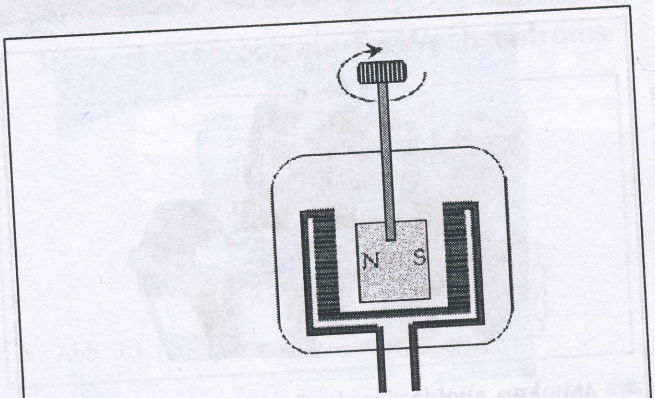


Abb. 3.1.2.1

Im analysierten Beispiel wurde ein Wechselstrom durch Rotation einer Schleife in einem unbeweglichen Magnetfeld erzeugt. Denselben Effekt erhält man bei feststehender Schleife durch Rotation des Magnetfeldes, das von einem Dauermagneten oder einem Elektromagneten erzeugt wird. Das ist die praktisch angewendete Lösung: der Rotor erzeugt das Magnetfeld (ist Induktor) und in den Stator wird die Wechselspannung induziert (Abb. 3.1.2.1). Die Enden der Rotorwicklung sind mit zwei Ringen auf der Drehachse verbunden , die voneinander und von der Achse isoliert sind. Dieser Typ von Generator heißt Einphasen-Synchrongenerator. Synchron, weil der induzierte Strom ein Magnetfeld erzeugt, das mit gleicher Winkelgeschwindigkeit rotiert wie der Rotor. Einphasig, weil auf dem Stator nur eine Gruppe von Wicklungen, in Reihe geschaltet, gewickelt ist.

In der Praxis werden oft Dreiphasen- Synchrongeneratoren verwendet, welche Dreiphasenstrom erzeugen. Sie haben drei Spulen auf dem Stator , gegeneinander um jeweils 120° versetzt. Auf der Schaltplatte dieses Generators sind nicht zwei, sondern sechs Klemmen angebracht, je zwei für jede Phase.

EXPERIMENT

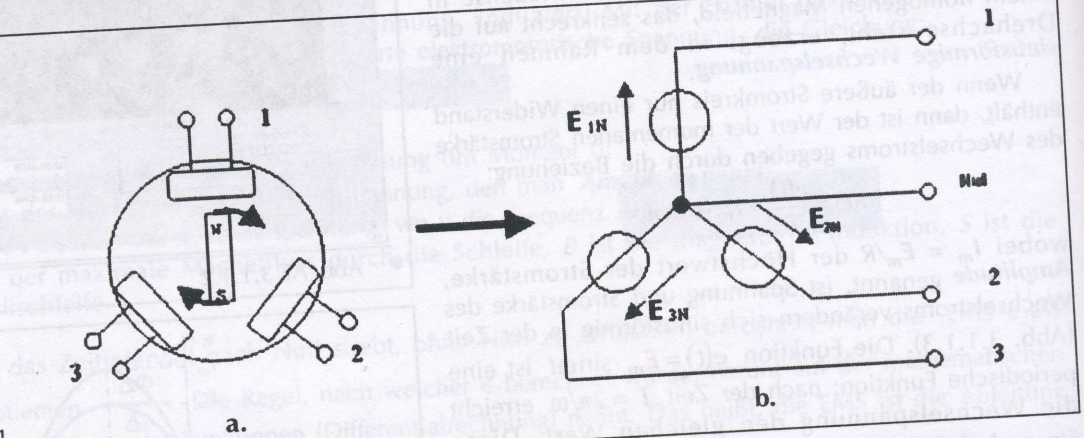


Abb. AE 3.1.2.1

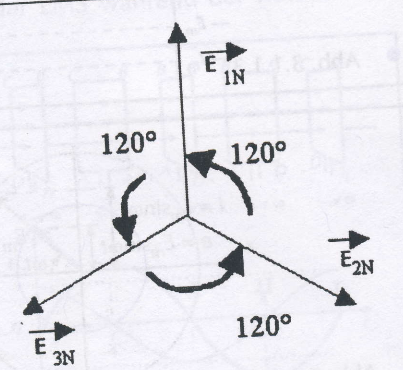


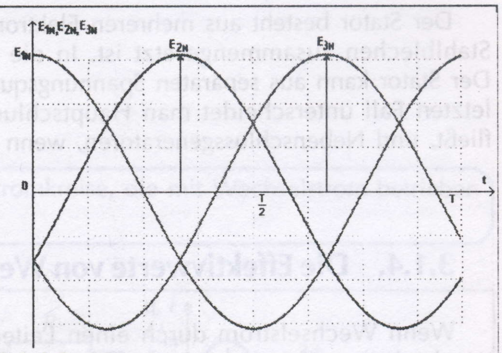
Abb. AE 3.1.2.2

Um die Funktion des Dreiphasenstromgenerators zu modellieren, verwendet drei Spulen mit hoher Induktivität (eventuell mit Eisenkern), einen Stabmagneten und drei Galvanometer mit Null in der Mitte der Skala, die mit jeweils einer Spule verbunden werden. Baut die Komponenten nach der Abb. AE 3.1.2.1-a auf, so dass der Magnet ungefähr gleichförmig gedreht werden kann. Der Abstand des Magneten von den Spulen soll möglichst gering sein. Verfolgt die Anzeige der Galvanometer. Die induzierten elektromotorischen Spannungen haben die gleichen Höchstwerte (Abb. AE 3.1.2.3), die aber der Reihe nach erreicht werden , wobei sie um 120° gegeneinander phasenverschoben sind, wie im Diagramm der Abb. AE 3.1.2.2.

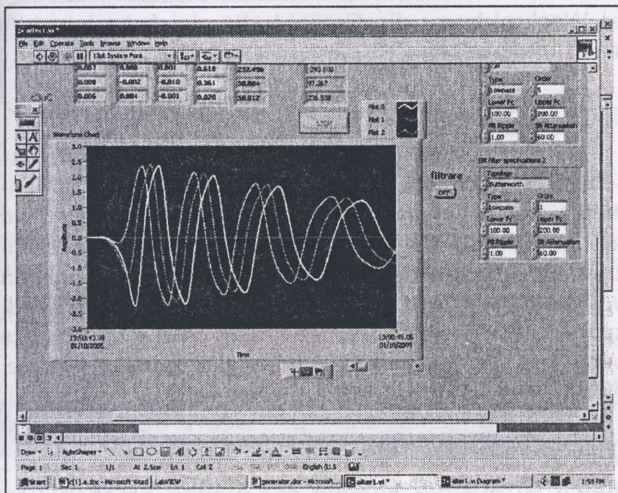
An Stelle der vorher beschriebenen Schaltung kann das Labormodell des Dreiphasenstromgenerators (Abb. AE 3.1.2.5) verwendet werden.

Wenn an die Stelle der drei Galvanometer die drei Kanäle eines Analog-Digital-Wandlers geschaltet werden, erhält man auf dem Computer für die Signale aus den Spulen die Schaubilder der Abb. AE 3.1.2.4. Die Signale sind stark gedämpft, weil es bei der Rotation starke Gegenkräfte gibt.

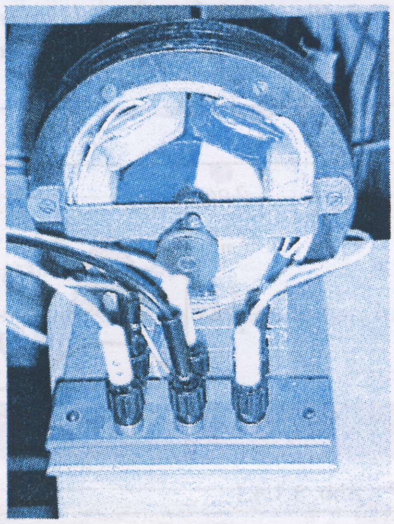
Der Dreiphasenstrom erzeugt in den feststehenden Spulen eines Elektromotors ein rotierendes Magnetfeld, welches die Rotoren der Asynchronmotoren antreibt.



• Fig. AE 3.1.2.3



• Abb. AE 3.1.2.4



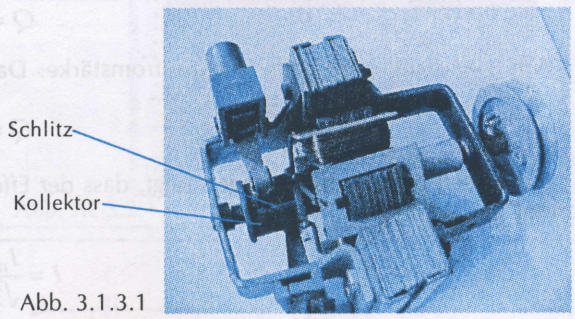
• Abb. AE 3.1.2.5

3.1.3. Der Gleichstromgenerator

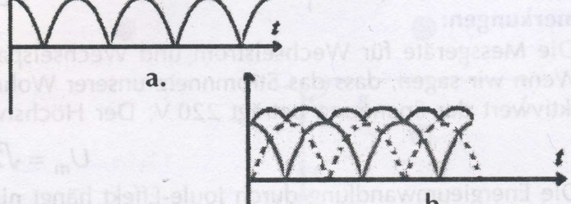
Der Gleichstromgenerator hat dasselbe Funktionsprinzip wie der Wechselstromgenerator: die Rotation einer Rechteckschleife in einem homogenen Magnetfeld. Der Unterschied ist in der Form des Kollektors, welcher aus zwei Halbringen besteht. Somit erhalten die Bürsten ständig die positive Halbwelle des Stromes und man erhält praktisch einen pulsierenden Gleichstrom (Abb. 3.1.3.1).

Bei der Erzeugung des Gleichstroms verwendet man zwei Rotorwicklungen, die senkrecht zueinander stehen, so wie bei dem erwähnten Labormodell. Ein an die Bürsten geschaltetes Galvanometer wird eine etwa konstante Stromstärke anzeigen (Abb. 3.1.3.2-a). In der Praxis sind Varianten mit 16 Spulen , die symmetrisch auf dem Rotor angebracht sind, angewendet, die eine fast konstante Spannung ergeben (Abb. 3.1.3.2-b).

Im Falle der Gleichstromgeneratoren hat der Stator die Rolle des Induktors, weil die Rotorwicklungen ständigen Kontakt mit den Kollektorstreifen haben müssen.



• Abb. 3.1.3.1



• Abb. 3.1.3.2

Der Stator besteht aus mehreren Elektromagneten mit massiven Stahlkernen, während der Kern des Rotors aus Stahlblechen zusammengesetzt ist. In die Einkerbungen des Rotors werden die Drahtwicklungen eingebracht. Der Stator kann aus separaten Spannungsquellen gespeist werden oder aus dem Rotor (Selbsterregung) . In diesem letzten Fall unterscheidet man Hauptschlussgeneratoren, wenn der gesamte Strom des Rotors durch den Stator fließt, und Nebenschlussgeneratoren, wenn nur ein Teil des Rotorstroms durch den Stator fließt.

3.1.4. Die Effektivwerte von Wechselstrom und Wechselspannung

Wenn Wechselstrom durch einen Leiter fließt, wird Wärme abgegeben. Die in einer bestimmten Zeit vom Wechselstrom erzeugte Wärme könnte in derselben Zeit auch von einem Gleichstrom von einer gewissen Stromstärke erzeugt werden. Diese Stromstärke nennt man Effektivwert des betreffenden Wechselstroms.

Definition: Man nennt ***Effektivwert der Stromstärke*** eines Wechselstroms die Größe I, die gleich ist mit der Stromstärke eines Gleichstroms, der auf demselben Widerstand in derselben Zeit dieselbe Joule-Wärme abgeben würde.

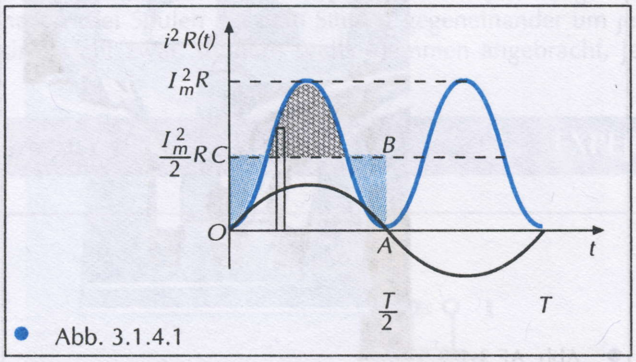


Abb. 3.1.4.1

Die Fläche von jedem schmalen Rechteck, wie das schwarze Rechteck aus der Abb. 3.1.4.1, ist zahlenmäßig gleich mit der Wärme, die auf dem Widerstand in der Zeit Δt abgegeben wird (wobei i praktisch konstant ist). Die Fläche, die vom Schaubild der Funktion und vom Abschnitt OA der Ox-Achse begrenzt wird, kann als Summe der Flächeninhalte solcher Rechtecke berechnet werden und ist somit gleich mit der Wärme, die in einer Halbperiode abgegeben wird (Abb. 3.1.4.1). Man bemerkt aber, dass die (schraffierte) Fläche oberhalb der gestrichelten Linie, vom Wert $R \cdot I_m^2/2$, gleich ist mit der Summe der blauen Flächen von unterhalb dieser Linie. Das bedeutet, dass die Fläche unterhalb der Kurve gleich ist mit der Fläche des Rechtecks OABC. Dementsprechend ist die in einer Halbperiode abgegebene Wärme

$$Q = R \cdot \frac{I_m^2}{2} \cdot \frac{T}{2}.$$

Wir bezeichnen mit I die Effektivstromstärke. Dann erhalten wir

$$Q = R \cdot I^2 \frac{T}{2}$$

Aus diesen beiden Beziehungen folgt, dass der Effektivwert der Stromstärke I des Wechselstroms durch folgende Formel gegeben ist:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \cdot I_m.$$

Gemäß der Formel $U = I \cdot R$ ist der Effektivwert der Wechselspannung gegeben durch die Formel:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 U_m.$$

Anmerkungen:

1) Die Messgeräte für Wechselstrom und Wechselspannung zeigen die Effektivwerte an.

2) Wenn wir sagen, dass das Stromnetz unserer Wohnung eine Spannung von 220 V hat, dann bedeutet das: der Effektivwert der Spannung beträgt 220 V. Der Höchstwert der Spannung ist

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U \approx 311\,\mathrm{V}.$$

3) Die Energieumwandlung durch Joule-Effekt hängt nicht vom Stromsinn ab. Deshalb verhält sich ein Widerstand im Wechselstrom so wie im Gleichstrom.

3.2. Stromkreiselemente

3.2.1. Einfache Wechselstromkreise

Definition: Man nennt ***Wechselstromkreise*** diejenigen elektrischen Stromkreise, die mit Wechselstrom betrieben werden

Stromkreise, die keine Spulen oder Kondensatoren enthalten, haben für Wechselstrom (von kleiner Frequenz) praktisch denselben Widerstand wie für Gleichstrom.

Wir betrachten einen Wechselstromkreis mit einem Widerstand *R* (Abb. 3.2.1.1-a), an dessen Klemmen die Wechselspannung $u(t) = U_m \cdot \sin\omega t$ angelegt wird.

Der Spannungsabfall auf dem Stromkreis ist

$$u = R \cdot i.$$

Für die Effektivwerte schreiben wir das Gesetz von Ohm wie folgt:

$$U = R \cdot I.$$

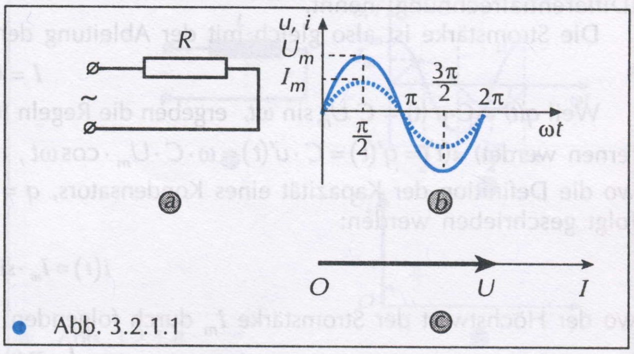


Abb. 3.2.1.1

Die Spannung und die Stromstärke erreichen gleichzeitig die Nullwerte und die Höchstwerte, sie sind also in Phase (Abb. 3.2.1.1-b). In der Abb. 3.2.1.1-c ist das Phasenzeigerdiagramm dargestellt.

Anmerkung: Die Tatsache,dass in der Abb. 3.2.1.1-b die Kurve der Spannung eine größere Amplitude hat, hat keine Bedeutung, da die vertikale Skala für u und i willkürlich gewählt wird.

EXPERIMENT

Ein Widerstand vom Wert R=200Ω erhält eine Wechselspannung von 8 V. Bei Verwendung eines Analog-Digital-Wandlers zur Darstellung der Spannung u und der Stromstärke i erhält man die grafischen Darstellungen aus der Abb. AE 3.2.1.1.

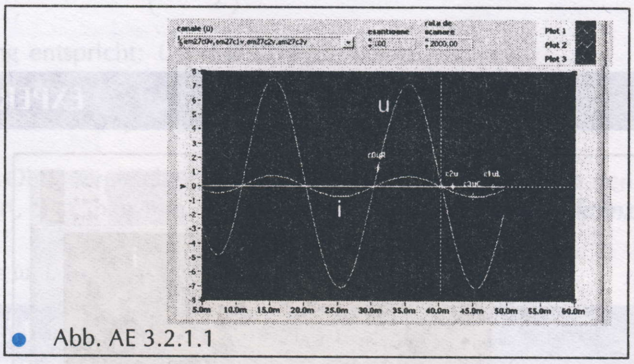


Abb. AE 3.2.1.1

Schlussfolgerung: ***Der Widerstand erzeugt keinen Phasenunterschied zwischen Spannung und Stromstärke.***

Wir betrachten dann einen Stromkreis, der einen idealen Kondensator der Kapazität *C* enthält (mit vernachlässigbarem *R* und *L*) (Abb. AE 3.2.1.2-a)

Anmerkung: Wenn an die Klemmen des Stromkreises eine Gleichspannung angelegt wird, fließt kein Strom, weil das Dielektrikum des Kondensators eine Unterbrechung des Stromkreises darstellt. Man kann sagen: *der Kondensator unterbricht den Gleichstromkreis.*

Wenn an die Klemmen des Kondensators eine Wechselspannung angelegt wird, fließt ein Strom. Man kann sagen: *der Kondensator schließt den Wechselstromkreis.*

Die Erklärung ist folgende: Wenn sich die Spannung im Ansteigen befindet, wird der Kondensator aufgeladen (auf seinen Platten wird elektrische Ladung gespeichert), und wenn die Spannung fällt, wird der Kondensator entladen und er trägt damit zur Erhaltung des Stromes im Stromkreis bei.

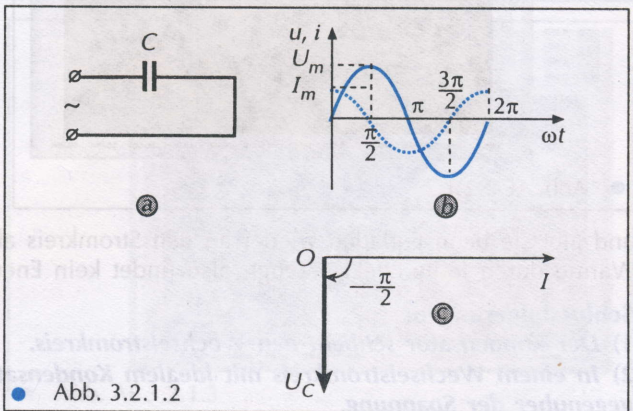


Abb. 3.2.1.2

Der Stator besteht aus m… Stahlblechen zusammeng… Der Stator kann aus sepa… letzten Fall unterschei… fließt, und Nebenschl…

…Stromkreises wird eine Wechselspannung geschaltet:

$$u(t) = U_m \cdot \sin\omega t\ .$$

…en, wenn nötig, eine bestimmte Regel zum Berechnen der Größen.

$= \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, für sehr kleines Δt, das heißt I ist der Grenzwert, zu dem der Zeitintervall nach Null strebt, ohne Null zu erreichen.

3.1.4. D…

…ematische Operation, die man Ableitung einer Funktion

Wenn … Wechsel… Stromst… …der Ladung nach der Zeit:

$$= Q'(t).$$

…Regeln für die Ableitung der Funktionen (die ihr in der Mathematik

Def…

St… $\cdot U_m \cdot \cos\omega t$,

…ines Kondensators, $q = C \cdot u$, verwendet wurde. Die obige Gleichung kann wie

$$i(t) = I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

…öchstwert der Stromstärke I_m durch folgenden Ausdruck gegeben ist:

$$I_m = \omega \cdot C \cdot U_m$$

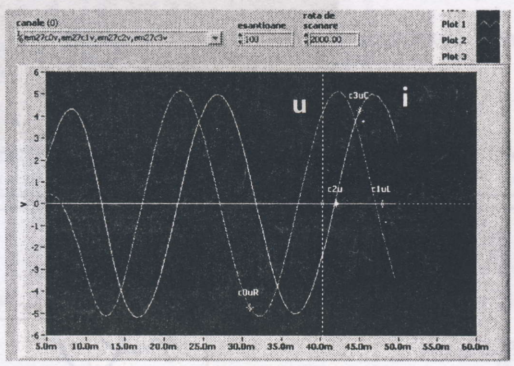
Wenn wir die Formel für $i(t)$ mit der Formel für die angelegte Spannung $u(t)$ vergleichen, bemerken wir, dass in einem Wechselstromkreis mit idealem Kondensator die Stromstärke einen Phasenvorsprung von $\pi/2$ gegenüber der Spannung hat (Abb. 3.2.1.2-b,c) oder, was dasselbe bedeutet, die Phase der Spannung um $\pi/2$ hinter der Phase der Stromstarke ist.

Wenn wir dann die obige Beziehung mit dem Gesetz von Ohm, $I_m = U_m/R$, vergleichen, stellen wir fest, dass der Kondensator in den Wechselstromkreis einen scheinbaren Widerstand einführt, den man mit X_C bezeichnet und ***kapazitive Reaktanz (kapazitiven Widerstand)*** nennt. Dieser hat die Formel:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}\ .$$

3

EXPERIMENT



• Abb. AE 3.2.1.2

Ein Widerstand vom Wert $R = 200\Omega$ ist mit einem Kondensator der Kapazitat $C = 122\mu F$ in Reihe geschaltet und an die Klemmen einer Wechselspannungsquelle von 8 V angeschlossen. Bei Verwendung des Analog-Digital-Wandlers, um die Spannung u und die Stromstärke i zu visualisieren, erhält man die grafischen Darstellungen aus der Abb. AE 3.2.1.2.

Anmerkungen:

1) Aus der Beziehung $X_C = U_m/I_m$ folgt $[X_C]_{IS} = \Omega$.

2) Der Kondensator erhält Energie aus dem Stromkreis (dann wenn die Spannung steigt), speichert sie als Energie des elektrischen Feldes zwischen seinen Platten und gibt sie beim Entladen wieder an den Stromkreis ab (wenn die Spannung fällt). Im Kondensator wird keine Wärme durch Joule-Effekt erzeugt, also findet kein Energieverlust statt.

Schlussfolgerungen:

1) Der Kondensator schließt den Wechselstromkreis.

2) In einem Wechselstromkreis mit idealem Kondensator hat die Stromstärke einen Phasenvorsprung von $\pi/2$ gegenuber der Spannung.

3) *Der Kondensator führt einen scheinbaren Widerstand in den Stromkreis ein, $X_C = 1/\omega \cdot C$, den man kapazitive Reaktanz nennt.*

4) *Wenn der Stromkreis außer dem Kondensator noch einen Widerstand enthält, hat die Stromstärke gegenüber der Spannung einen Phasenvorsprung $\phi < \frac{\pi}{2}$.*

5) *In diesem Fall sieht das Phasenzeigerdiagramm wie in Abb. 3.2.1.3 aus.*

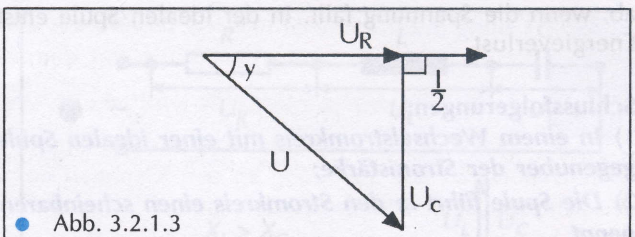


Abb. 3.2.1.3

Wir betrachten schließlich einen Stromkreis, der eine ideale Spule (mit vernachlässigbarem R und C) mit der Induktivität L enthält (Abb. 3.2.1.4).

Wenn an die Klemmen des Stromkreises eine Wechselspannung angelegt wird, fließt ein Strom

$$i(t) = I_m \cdot \sin\omega t \,.$$

Dieser Strom erzeugt ein veränderliches Magnetfeld und somit wird in die Spule durch Selbstinduktion eine elektromotorische Spannung induziert:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \,.$$

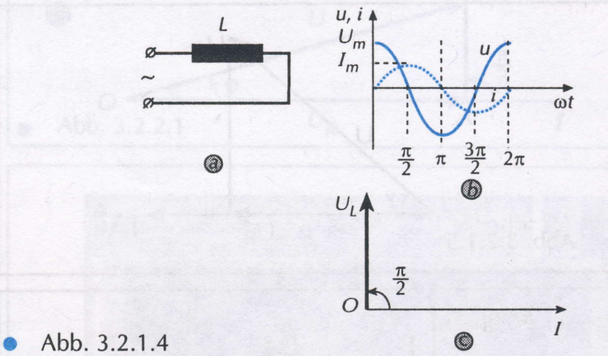


Abb. 3.2.1.4

Bei Verwendung der Regel für die Berechnung des Quotienten $\Delta I/\Delta t$, wenn das Zeitintervall nach Null strebt, ohne Null zu erreichen, erhält man: $e(t) = -L \cdot i'(t) = -\omega \cdot L \cdot I_m \cdot \cos\omega t$.

Weil die Spule eine ideale Spule ist (R = 0), findet auf der Spule kein Spannungsabfall statt und demnach ist die induzierte elektromotorische Spannung gleich und entgegengesetzt der angelegten Spannung $u(t) = -e(t)$, also:

$$u(t) = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \cos\omega t \,.$$

Dieser Ausdruck kann wie folgt geschrieben werden: $u(t) = U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$

wo der Höchstwert der Spannung U_m folgender Beziehung entspricht: $U_m = \omega \cdot L \cdot I_m$.

Wenn wir die Formel für $u(t)$ mit der Formel für die Stromstärke $i(t)$ vergleichen, stellen wir fest, dass in einem Wechselstromkreis mit idealer Spule die Spannung einen Phasenvorsprung von $\pi/2$ gegenuber der Stromstärke hat (Abb. 3.2.1.4-b,c).

Wenn wir dann die obige Formel mit dem Gesetz von Ohm vergleichen, stellen wie fest, dass die Spule in den Wechselstromkreis einen scheinbaren Widerstand einführt, den man mit X_L bezeichnet und ***induktive Reaktanz*** (induktiven Widerstand) nennt. Dieser hat die Formel

$$X_L = \omega \cdot L \,.$$

EXPERIMENT

Ein Widerstand vom Wert R=200Ω und eine Spule mit der Induktivitat L=35mH werden in Reihe an die Klemmen einer Wechselspannungsquelle von 8 V geschaltet. Bei Verwendung des Analog-Digital-Wandlers, um die Spannung und die Stromstärke zu visualisieren, erhält man die grafischen Darstellungen aus der Abb. AE 3.2.1.3.

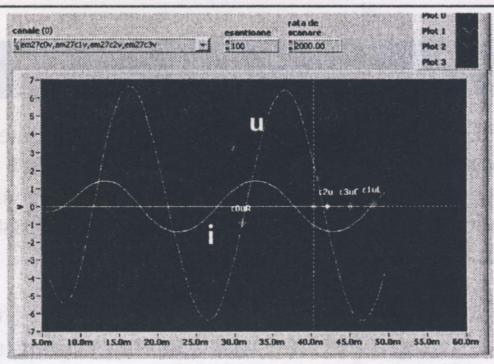


Abb. AE 3.2.1.3

Anmerkungen:

1) Aus der Beziehung $X_L = U_m/I_m$ folgt $[X_L]_{IS}$ = Ω.

2) Die Spule erhält Energie aus dem Stromkreis (wenn die Spannung steigt), wandelt sie in Energie des Magnetfeldes um und gibt sie wieder an den Stromkreis

ab, wenn die Spannung fällt. In der idealen Spule entsteht keine Wärme durch Joule-Effekt, also gibt es keinen Energieverlust.

Schlussfolgerungen:

1) In einem Wechselstromkreis mit einer idealen Spule hat die Spannung einen Phasenvorsprung von von $\pi/2$ gegenuber der Stromstärke;

2) Die Spule führt in den Stromkreis einen scheinbaren Widerstand $X_L = \omega \cdot L$ ein, den man induktive Reaktanz nennt

3) Wenn der Stromkreis außer der Spule noch einen Widerstand enthält (jede reale Spule besitzt einen von Null verschiedenen Widerstand), dann ist die Phasenverschiebung der Spannung gegenüber der Stromstärke $\phi < \dfrac{\pi}{2}$.

4) In diesem Fall sieht das Phasenzeigerdiagramm so aus wie in der Abb. 3.2.1.5.

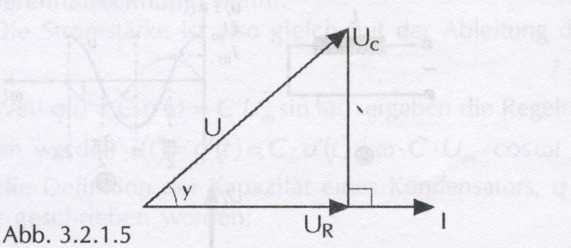


Abb. 3.2.1.5

In der Abb. 3.2.1.6 ist die Abhängigkeit des Widerstands, sowie der kapazitiven und induktiven Reaktanz von der Frequenz grafisch dargestellt. Man stellt fest:

a) Mit steigender Frequenz strebt die kapazitive Reaktanz nach Null und die induktive Reaktanz nach Unendlich;

b) Wenn die Frequenz nach Null strebt (Grenzfall: der Gleichstrom), dann strebt die induktive Reaktanz nach Null und die kapazitive Reaktanz nach Unendlich (der Kondensator öffnet den Stromkreis).

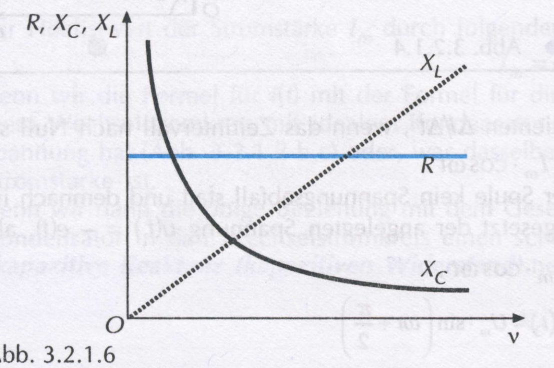


Abb. 3.2.1.6

Anmerkungen:

1) Von den drei Stromkreiselementen, idealer Widerstand, idealer Kondensator und ideale Spule wird nur auf dem Widerstand Wärme durch Joule-Effekt abgegeben. Deshalb nennt man ihn auch noch ***aktiven Widerstand***. Er ist das einzige Element mit Energieverlust.

2) Die Stromkreiselemente wurden in diesem Abschnitt als ideal angenommen. Die realen Stromkreiselemente haben ein komplexes Verhalten. Zum Beispiel hat eine reale Spule sowohl Induktivität, als auch Widerstand.

3.2.2. Der Wechselstromkreis mit Widerstand, Spule und Kondensator (R, L, C) in Reihe

Wir betrachten einen Stromkreis, gebildet aus einem Wierstand R, einer idealen Spule mit der Induktivität L und einem idealen Kondensator mit der Kapazität C, alle in Reihe geschaltet. An die Klemmen des Stromkreises wird eine Wechselspannung angelegt (Abb. 3.2.2.1-a).

EXPERIMENT

Ein Widerstand vom Wert R=200 Ω, eine Spule mit der Induktivitat L=35 mH und ein Kondensator mit der Kapazität C=122 µF sind in Reihe geschaltet und an eine Wechselspannung von 8 V angeschlossen. Mit einem Analog-Digital-Wandler wird die Spannung an den Klemmen der Spule u_L, die Spannung an den Klemmen des Kondensators u_C und die Stromstärke i erfasst und visualisiert und man erhält die Schaubilder aus der Abb. AE 3.2.2.1.

Im Stromkreis fließt ein Strom mit dem Effektivwert I. Gemäß dem bisher Gelernten:

a) an den Klemmen des Widerstands entsteht ein Spannungsabfall $U_R = I \cdot R$ in Phase mit der Stromstärke I;

b) an den Klemmen der Spule entsteht ein Spannungsabfall $U_L = I \cdot X_L$, mit der Phase um $\pi/2$ vor der Stromstarke I;

c) an den Klemmen des Kondensators entsteht ein Spannungsabfall $U_C = I \cdot X_C$, mit der Phase um $\pi/2$ hinter der Stromstarke I.

In der Phasenzeigerdarstellung ist die Spannung U an den Klemmen den Stromkreises die Summe dieser Spannungsabfälle (Abb. 3.2.2.1-b). Aus dem rechtwinkligen Dreieck OAB, das man **Dreieck der Spannungen** nennt, erhält man mit dem Satz von Pythagoras:

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 ,$$

Von wo mit obigen Beziehungen für die Spannungen folgt:

$$U = I \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} .$$

Die Größe, definiert durch die Beziehung

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

heißt **Impedanz** des Serienstromkreises RLC.

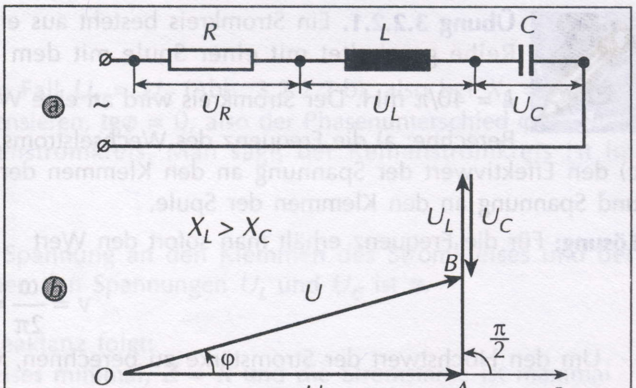


Abb. 3.2.2.1

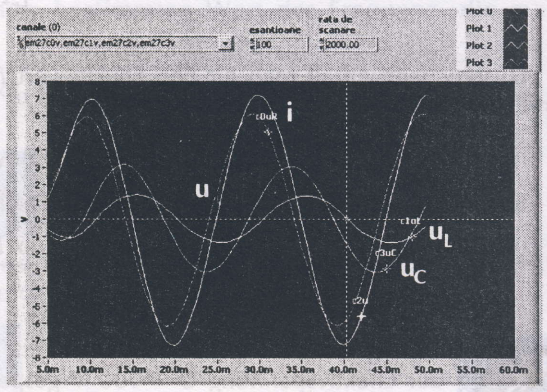


Abb. AE 3.2.2.1

Anmerkungen:

1) Aus der Definition folgt $[Z]_{IS} = \Omega$.

2) Die Impedanz ist der Ersatzwiderstand des gesamten Stromkreises im Wechselstrom.

Aus den beiden letzten Beziehungen folgt $U = I \cdot Z$, welche das Gesetz vom Ohm für Wechselstromkreise darstellt.

Aus dem Dreieck der Spannungen kann auch die Formel für den Phasenunterschied φ der Spannung U an den Enden des Stromkreises in Bezug auf die Stromstärke I berechnet werden:

$$\text{tg}\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X_L - X_C}{R} .$$

Anmerkung: In dem in der Abb. 3.2.2.1-b dargestellten Fall ist $U_L > U_C$ und also $X_L > X_C$. Das bedeutet, dass der induktive Effekt stärker ist als der kapazitive Effekt und, gemäß der vorigen Formel $\text{tg}\varphi > 0$, der Phasenunterschied φ ist positiv.

Also: *wenn die Stromstärke im Stromkreis* $i(t) = I_m \cdot \sin \omega t$ *ist, dann ist die Spannung an den Klemmen des Stromkreises*

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

In der Abb. 3.2.2.1-b wurde das Spannungsdreieck für den Fall $U_L > U_C$ gezeichnet. Es ist aber möglich, dass $U_L < U_C$ oder $U_L = U_C$. Für diese Fälle wurde das Phasenzeigerdiagramm in der Abb. 3.2.2.2-a und 3.2.2.2-b dargestellt.

Im ersten Fall Abb. 3.2.2.2-a) $U_L < U_C$ und demnach $X_L < X_C$. Das bedeutet, dass der kapazitive Effekt gegenüber dem induktiven vorherrschend ist, $\text{tg}\varphi < 0$, der Phasenunterschied ist negativ.

Im zweiten Fall (Abb. 3.2.2.2-b) $U_L = U_C$ und $X_L = X_C$. Das bedeutet, dass sich kapazitiver und induktiver Effekt gegenseitig kompensieren, $\text{tg}\varphi = 0$, der Phasenunterschied φ ist Null. Dieser Fall heißt **Resonanz der Spannungen** und wird im nächsten Abschnitt behandelt.

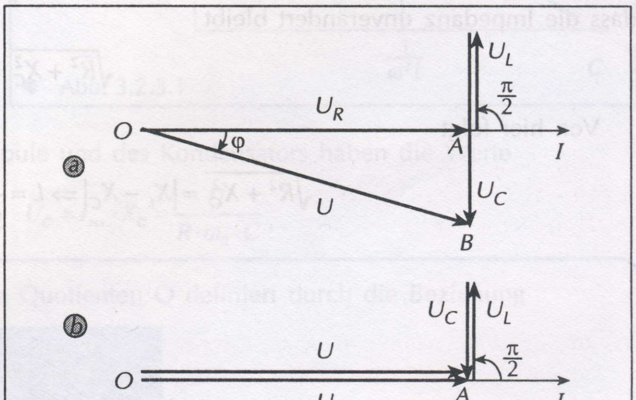


Abb. 3.2.2.2

Übung 3.2.2.1. Ein Stromkreis besteht aus einem Kondensator mit der Kapazität $C = 10/(7\pi)$ mF, in Reihe geschaltet mit einer Spule mit dem aktiven Widerstand $r = 4\ \Omega$ und mit der Induktivitat $L = 40/\pi$ mH. Der Stromkreis wird an eine Wechselspannung $u(t) = 20\sqrt{2}\cdot\sin(100\pi\cdot t)$ angeschlossen.

Berechne: a) die Frequenz des Wechselstroms, b) den Höchstwert und den Effektivwert der Stromstärke, c) den Effektivwert der Spannung an den Klemmen der Spule, d) den Phasenunterschied zwischen Stromstärke und Spannung an den Klemmen der Spule.

Lösung: Für die Frequenz erhält man sofort den Wert

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 50\,\text{Hz}\,.$$

Um den Höchstwert der Stromstärke zu berechnen, verwendet man das Gesetz von Ohm

$$I = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{r^2 + \left(\omega\cdot L - \dfrac{1}{\omega\cdot C}\right)^2}} = 4\sqrt{2}\,\text{A}\,.$$

Entsprechend erhält man für den Effektivwert $I = 4$ A. Die Spule hat sowohl Induktivität als auch Widerstand und deshalb

$$U_L = I\cdot\sqrt{r^2 + \omega^2\cdot L^2} = 22{,}63\,\text{V}\,.$$

Schließlich erhält man für den Phasenunterschied

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega\cdot L}{R} \Rightarrow \varphi = \operatorname{arctg}\frac{\omega\cdot L}{R} = \frac{\pi}{4}\,.$$

Übung 3.2.2.2. Ein Wechselstromkreis, der von einem Generator mit der Frequenz $\nu = 5$ kHz und mit der Effektivspannung U = 100 V gespeist wird, besteht aus einem Widerstand R = 200 Ω und einem Kondensator mit der Kapazität $C = 200/\pi$ nF. Berechne: a) die kapazitive Reaktanz, b) den Höchstwert der Spannung des Generators, c) den Effektivwert der Stromstärke, d) die Induktivität, welche an die Stelle des Widerstands geschaltet, die Stromstärke nicht verändern würde.

Lösung: Für die kapazitive Reaktanz und für den Höchstwert der Generatorspannung erhält man sofort die Werte

$$X_C = \frac{1}{2\pi\cdot\nu\cdot C} = 500\,\Omega\,,\quad U_m = U\cdot\sqrt{2} = 141\,\text{V}\,.$$

Um den Effektivwert der Stromstärke zu berechnen verwenden wir das Gesetz von Ohm

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = 186\,\text{mA}\,.$$

Wenn beim Ersetzen des Widerstands durch eine Spule die Stromstärke unverändert bleiben soll, ist es nötig, dass die Impedanz unverändert bleibt

$$\sqrt{R^2 + X_C^2} = |X_L - X_C|\,.$$

Von hier folgt

$$\sqrt{R^2 + X_C^2} = |X_L - X_C| \Rightarrow L = \frac{1}{\omega}\left(X_C \pm \sqrt{R^2 + X_C^2}\right) = \begin{cases} 9{,}25\,\text{H} \\ 9{,}21\,\text{H} \end{cases}.$$

3.2.3. Die Resonanz der Spannungen

Im vorigen Abschnitt haben wir gesehen, dass in dem Fall $U_L = U_C$ (Abb. 3.2.2.2-b), also bei $X_L = X_C$, der kapazitive und der induktive Effekt sich gegenseitig kompensieren, $\mathrm{tg}\varphi = 0$, also der Phasenunterschied φ ist Null. Dieser Fall heißt ***Resonanz der Spannungen*** im Reihenstromkreis. Man sagt, der Reihenstromkreis ist im ***Resonanzbetrieb***.

Anmerkung: φ ist der Phasenunterschied zwischen der Spannung an den Klemmen des Stromkreises und der Stromstärke im Stromkreis. Der Phasenunterschied zwischen den Spannungen U_L und U_C ist π.

Aus der Gleichheit der induktiven und kapazitiven Reaktanz folgt:

1) Bei Resonanz ist die Impedanz des Reihenstromkreises minimal, $Z = R$ und die Stromstärke ist maximal

$$I_{res} = \frac{U}{R}.$$

2) Die Resonanz der Spannungen erscheint nur bei einem bestimmten Wert der Frequenz, die man ***Resonanzfrequenz*** nennt:

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} \Rightarrow \omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C} \Rightarrow$$

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

welche nur von den Werten der Induktivität der Spule und der Kapazität des Kondensators abhängt. Dementsprechend hat die Periode der Wechselspannung bei Resonanz die Formel:

$$T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C},$$

Diese Formel heißt ***Formel von Thomson***.

Gegeben ist die Formel der Stromstärke I im Reihenstromkreis

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \dfrac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}.$$

Wenn man den Wert der Induktivität festlegt und einen Drehkondensator mit veränderlicher Kapazität verwendet, kann man die Werte der Stromstärke I in Funktion von C bestimmen. Durch Verwenden verschiedener Widerstände erhält man verschiedene Kurven, wie jene aus der Abb. 3.2.3.1, die man ***Resonanzkurven*** nennt. Das Maximum der Kurven entspricht, gemäß obiger Beziehung, dem Wert $C = 1/(\omega^2 \cdot L)$ und ist um so stärker ausgeprägt, je kleiner der Widerstand R ist.

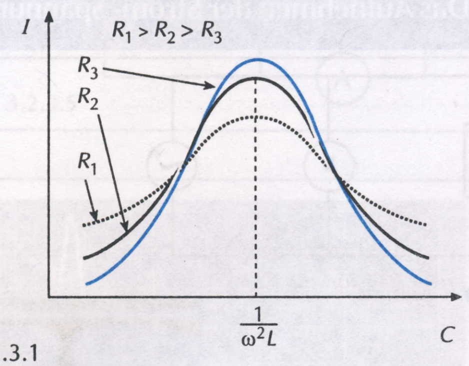


Abb. 3.2.3.1

Bei Resonanz ist die Stromstärke im Stromkreis maximal; die Effektivspannungen an den Klemmen der Spule und des Kondensators haben die Werte

$$U_L = I_{res} \cdot X_L = \frac{U \cdot \omega_0 \cdot L}{R}, \quad U_C = I_{res} \cdot X_C = \frac{U}{R \cdot \omega_0 \cdot C}.$$

Definition: Man nennt ***Gütefaktor des Stromkreises*** den Quotienten Q definiert durch die Beziehung

$$Q = \left(\frac{U_L}{U}\right)_{\omega=\omega_0} = \left(\frac{U_C}{U}\right)_{\omega=\omega_0}.$$

Anmerkung: Der Gütefaktor zeigt, wieviel Mal bei Resonanz die Spannung auf der Spule oder auf dem Kondensator größer ist als die Spannung an den Enden des Stromkreises. Deshalb heißt der Quotient Q auch noch ***Überspannungsfaktor***.

Mit den Formeln der Spannungen U_L und U_C bei Resonanz, eingesetzt in die Definition von Q und durch Einsetzen der Resonanzpulsation ω_0, erhält man

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Diese Beziehung zeigt, dass für

$$\sqrt{\frac{L}{C}} \gg R \Rightarrow Q \gg 1,$$

bei Resonanz, die Spannungen auf der Spule und auf dem Kondensator viel größer sind als die Spannung an den Enden des Stromkreises.

Anmerkung: Die Größe $Z_0 = \sqrt{L/C}$ heißt ***charakteristische Impedanz*** des Stromkreises.

Übung 3.2.3.1. Ein Wechselstromkreis, angeschlossen an eine Spannung $U = 220$ V mit der Frequenz $\nu = 50$ Hz, besteht aus einem Widerstand $R = 30\ \Omega$ in Reihe mit einer Spule vom Widerstand Null und einem Kondensator. Bei der genannten Frequenz hat die Spule eine induktive Reaktanz $X_L = 160\ \Omega$ und der Kondensator eine kapazitive Reaktanz $X_C = 120\ \Omega$.
Berechne: a) die Stromstärke im Stromkreis; b) die Frequenz, bei welcher Resonanz auftritt.

Lösung: a) Aus dem Gesetz von Ohm erhält man $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = 4{,}4\ \text{A}.$

b) Für die Resonanzfrequenz findet man den Wert $\nu_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \nu \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = 43{,}5\ \text{Hz}.$

LABORATORIUMSARBEIT
Das Aufnehmen der Strom- Spannungs-Kennlinie eines Stromkreiselementes im Wechselstrom

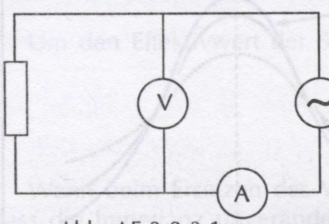


Abb. AE 3.2.3.1

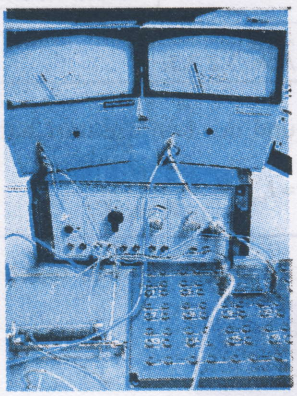


Abb. AE 3.2.3.2

Die Kennlinie eines Dipols stellt die Abhängigkeit der Stromstärke von der angelegten Spannung $I = I(U)$ dar.

Um die Kennlinie von Widerständen, Spulen und Kondensatoren aufzunehmen, werdet ihr einfache Stromkreise verwenden, die von einer Wechselspannungsquelle gespeist werden.

Durchführung

Zur Messung der angelegten Spannung und der Stromstärke verwendet ihr Voltmeter und Amperemeter für Wechselstrom, die wie im Schema der Abb. AE 3.2.3.1 geschaltet werden. Um die Werte der angelegten Spannung zu verändern, ist ein Rheostat nötig (Abb. AE 3.2.3.2).

Schaltet der Reihe nach in den Stromkreis zwei Widerstände mit verschiedenen Werten. Ändert die angelegte Spannung und lest die Werte der Spannung, bzw. der Stromstärke.

Schreibt die Daten in eine Tabelle von folgender Form:

$U(V)$	$I_1(mA)$	$I_2(mA)$	$R_1 = U/I_1(k\Omega)$	$R_2 = U/I_2(k\Omega)$

Stellt die Abhängigkeiten $I_1 = I(U)$ şi $I_2 = I(U)$ grafisch dar (Abb. AE 3.2.3.3).

Berechnet danach die Werte der Widerstände als konstanten Quotient (in den Grenzen der Messfehler) zwischen U und I oder aus der Neigung der Kennlinie $I = I(U)$, welche im Falle der Widerstände liniar ist.

Beobachtet die Übereinstimmung der berechneten Werte für jeden Widerstand bei direkter und umgekehrter Schaltung, sowie mit dem aufgedruckten Wert.

Schaltet dann eine Spule in Reihe mit dem Widerstand (Abb. AE 3.2.3.4) und wiederholt die Operationen von vorher. Schreibt die Daten in eine Tabelle von folgender Form

$U(V)$	$I(mA)$	$Z=U/I(k\Omega)$	$X_L=2\pi\nu L(k\Omega)$	$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$

Stellt die Abhängigkeit $I = I(U)$ grafisch dar.

Vergleicht die für die Impedanz Z des Abschnittes RL erhaltenen Werte.

Ersetzt die Spule mit einem Kondensator (Abb. AE 3.2.3.5), wiederholt die vorigen Operationen und ergänzt die folgende Tabelle.

$U(V)$	$I(mA)$	$Z=U/I(k\Omega)$	$X_L=\dfrac{1}{2\pi\nu C}(k\Omega)$	$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$

Stellt die Abhängigkeit $I = I(U)$ grafisch dar.

Vergleicht die für die Impedanz Z des Abschnittes RC erhaltenen Werte.

Erweiterung

Verwendet in den beschriebenen Stromkreisen einen Generator mit veränderlicher Frequenz, um die Kennlinien $U_L = U_L(\nu)$ und $U_R = U_R(\nu)$ im Reihenstromkreis RL, bzw. $U_c = U_c(\nu)$ und $U_R = U_R(\nu)$ im Reihenstromkreis RC aufzunehmen.

Führt in den Stromkreis sowohl die Spule als auch den Kondensator in Reihe mit dem Widerstand ein. Haltet die Spannung des Generators konstant und verändert die Frequenz. Messt die Stromstärke in Funktion der Frequenz. Stellt grafisch dar $I = I(\nu)$ (Abb. AE 3.2.3.6).

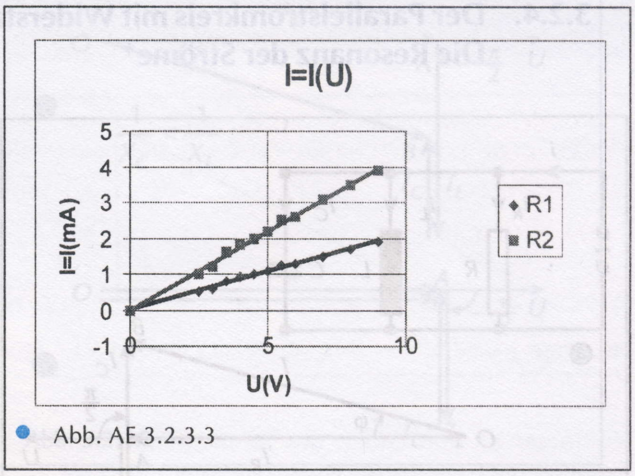


Abb. AE 3.2.3.3

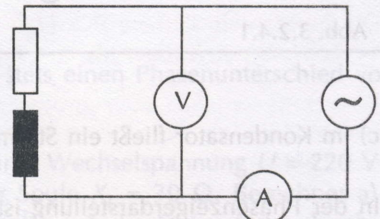


Abb. AE 3.2.3.4

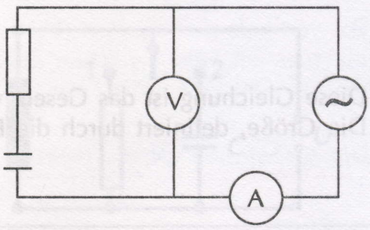


Abb. AE 3.2.3.5

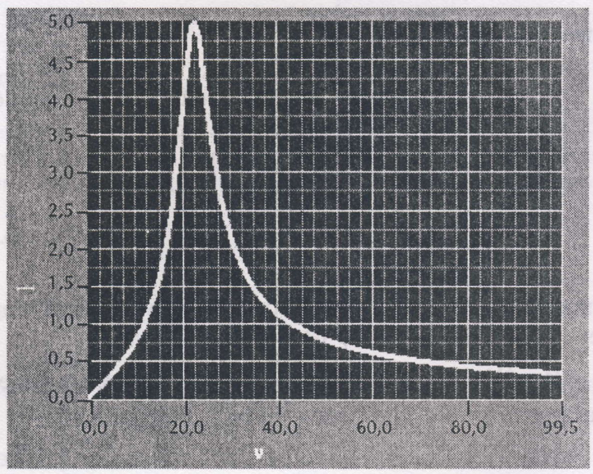
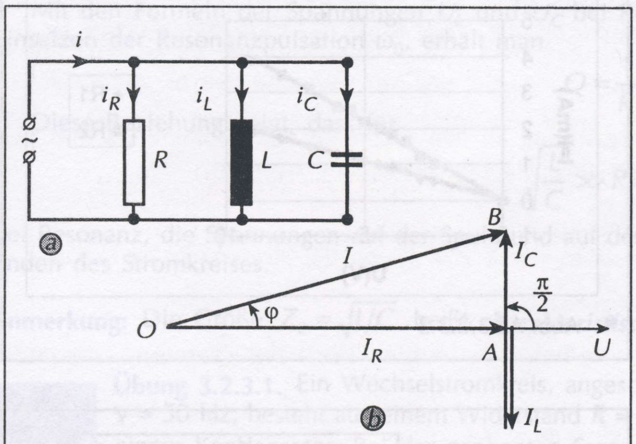


Abb. AE 3.2.3.6

3.2.4. Der Parallelstromkreis mit Widerstand, Spule und Kondensator im Wechselstrom*. Die Resonanz der Ströme*



• Abb. 3.2.4.1

Wir betrachten einen Stromkreis, gebildet aus einem Widerstand R, einer Spule mit der Induktivität L und einem Kondensator mit der Kapazität C, die parallel geschaltet sind. An die Klemmen des Stromkreises wird eine Wechselspannung angelegt (Abb. 3.2.4.1-a).

$$u(t) = U_m \cdot \sin\omega t\ .$$

Die 3 Stromkreiselemente haben jedes an seinen Klemmen die Effektivspannung U. Entsprechend dem bisher Gelernten:

a) im Widerstand fließt ein Strom

$$I_R = \frac{U}{R}$$ in Phase mit der Spannnung U,

b) in der Spule fließt ein Strom $I_L = \dfrac{U}{X_L}$, mit der Phase um $\pi/2$ hinter der Spannung U,

c) im Kondensator fließt ein Strom $I_C = \dfrac{U}{X_C}$, mit der Phase um $\pi/2$ vor der Spannung U.

In der Phasenzeigerdarstellung ist der Gesamtstrom I die Summe dieser 3 Ströme (Abb. 3.2.4.1-b). Aus dem rechtwinkligen Dreieck OAB, das man ***Dreieck der Ströme*** nennt, erhält man mit dem Satz von Pythagoras $I^2 = I_R^2 + (I_L - I_C)^2$, von wo mit den Formeln der Ströme von oben folgt:

$$I = U \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}\ .$$

Diese Gleichung ist das Gesetz von Ohm $U = I \cdot Z$ für den Parallelstromkreis.
Die Größe, definiert durch die Beziehung

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}}$$

heißt ***Impedanz*** des Parallelstromkreises RLC.

Anmerkungen:

1) Aus der Definition folgt $[Z]_{IS} = \Omega$.

2) Die Impedanz ist der Ersatzwiderstand des gesamten Parallelstromkreises im Wechselstrom.

Aus dem Dreieck der Ströme kann der Phasenunterschied φ der Gesamtstromstärke I gegenüber der Spannung U berechnet werden:

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{I_C - I_L}{I_R} = R\left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right).$$

Anmerkung: In dem in der Abb. 3.2.4.1-b dargestellten Fall ist $I_C > I_L$ und deshalb $1/X_C > 1/X_L$. Das heißt $\mathrm{tg}\varphi > 0$, der Phasenunterschied φ ist positiv.

Also: Wenn an die Klemmen des Stromkreises eine Spannung $u(t) = U_m \cdot \sin\omega t$ geschaltet wird, dann hat der Gesamtstrom die Gleichung $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$.

In der Abb. 3.2.4.1-b wurde das Dreieck der Ströme für den Fall $I_C > I_L$ gezeichnet. Es kann aber auch $I_C < I_L$, oder $I_C = I_L$. Für diese beiden Fällen ist das Phasenzeigerdiagramm in den Abb. 3.2.4.2-a und 3.2.4.2-b gegeben.

Im ersten Fall (Abb. 3.2.4.2-a) ist $I_C < I_L$ und deshalb $1/X_C < 1/X_L$. Es folgt tgφ < 0, also der Phasenunterschied φ ist negativ.

Im zweiten Fall (Abb. 3.2.4.2-b) ist $I_C = I_L$ und deshalb $X_L = X_C$. Es folgt tgφ = 0, also der Phasenunterschied ist Null. Dieser Fall heißt ***Resonanz der Ströme*** im Parallelstromkreis.

Aus der Beziehung $X_L = X_C$ erhält man für die Resonanzfrequenz dieselbe Formel wie beim Reihenstromkreis

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}\,.$$

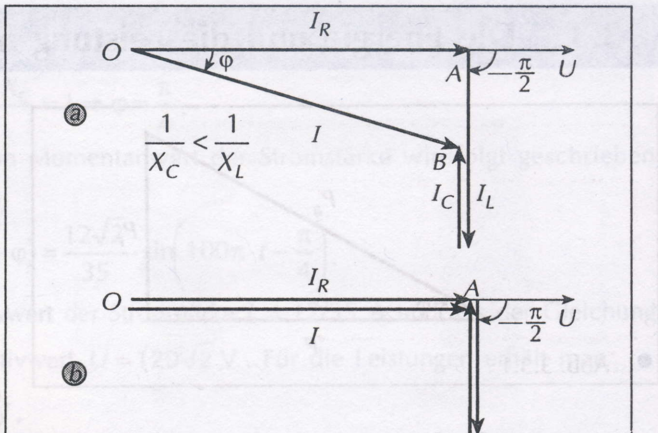


Abb. 3.2.4.2

Aus der Beziehung

$$I = U \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}$$

folgt, dass ***bei der Resonanz der Ströme die Gesamtstromstärke im Stromkreis minimal ist*** und den Effektivwert $I_{res} = \frac{U}{R}$ hat.

Das ist damit zu erklären, dass bei Resonanz die Ströme I_L und I_C, die stets einen Phasenunterschied von π haben, gleichen Wert haben.

Übung 3.2.4.1. Wenn der Stromkreis aus der Abb. E 3.2.4.1 mit einer Wechselspannung $U = 220$ V mit der Frequenz ν = 50 Hz gespeist wird, beträgt die Reaktanz der Spule $X_L = 30\ \Omega$. Berechne: a) die Werte R und C, so dass beim Schließen des Schalters k auf Position 1 die Stromstärke durch den Generator doppelt so groß ist wie bei offenem Schalter k und bei Schalterposition 2 diese Stromstärke 4/9 derjenigen der offenen Schalterposition beträgt; b) die Resonanzfrequenz des Stromkreises bei Schalterposition 2.

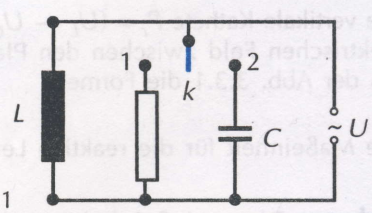


Abb. E 3.2.4.1

Lösung: Wir bezeichnen mit I die Stromstärke bei offenem Schalter, mit I_1 die Stromstärke bei Schalterposition 1 und mit I_2 diejenige bei Schalterposition 2.

Für offenen Schalter haben wir: $I = \frac{U}{X_L}$.

Für die Schalterposition 1 haben wir: $I_1 = U \cdot \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}$

Die Bedingung der Aufgabe ist $I_1 = 2 \cdot I$. Wenn man in dieser Beziehung die beiden vorigen Beziehungen verwendet, erhält man:

$$\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2} = \frac{4}{X_L^2} \Rightarrow R = \frac{X_L}{\sqrt{3}} = 17{,}32\ \mathrm{V}\,.$$

Für die Schalterposition 2 haben wir: $I_2 = U \cdot |X_L - X_C|$

Die Bedingung der Aufgabe ist $I_2 = 4 \cdot I/9$. Wenn wir hier die Gleichungen für I und I_2 verwenden, erhalten wir

$$C_1 = \frac{5}{9} \cdot \frac{1}{\omega \cdot X_L} = 58{,}9\ \mu\mathrm{F}\ (X_L > \omega \cdot C).$$

$$C_2 = \frac{13}{9} \cdot \frac{1}{\omega \cdot X_L} = 153{,}14\ \mu\mathrm{F}\ (\text{für } X_L < \omega \cdot C)$$

Bei Resonanz $\nu_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{X_L \cdot \frac{C}{\omega}}}$, und, entsprechend den beiden Werten der Kapazität C, erhält man die Werte $\nu_{01} = 67{,}1\ \mathrm{Hz}$, $\nu_{02} = 41{,}6\ \mathrm{Hz}$.

3.3. Die Energie und die Leistung in Wechselstromkreisen

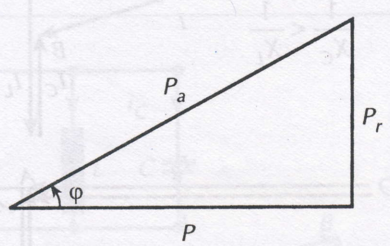


Abb. 3.3.1

Wir betrachten wieder das Dreieck OAB der Spannungen (Abb. 3.2.2.1-b) für den Reihenstromkreis. Wenn wir die Werte der Seiten des Dreiecks mit der effektiven Stromstärke I multiplizieren, erhalten wir ein neues Dreieck, dessen Seitenlängen die Werte der Leistungen darstellen (Abb. 3.3.1).

Im Dreieck der Leistungen stellt die Hypothenuse die ***Scheinleistung*** dar

$$P_a = U \cdot I \,,$$

die so genannt wird, weil es die Leistung ist, die man erhält, wenn man das Produkt macht aus der von einem Voltmeter an den Enden des Stromkreises angezeigten Spannung U und der Stromstärke I, die von einem Amperemeter angezeigt wird. Die Scheinleistung ist die Energie, die der Generator in jeder Sekunde an den Stromkreis liefert. Die Maßeinheit der Scheinleistung heißt ***Volt-Ampere*** und wird mit VA bezeichnet.

Die horizontale Kathete $P = U_R \cdot I$ stellt die auf dem Widerstand R abgegebene Leistung dar und heißt deshalb ***aktive Leistung***. Aus der Abb. 3.3.1 folgt

$$P = P_a \cdot \cos\varphi = U \cdot I \cdot \cos\varphi \,.$$

Die Maßeinheit der aktiven Leistung ist das Watt.
Der Faktor

$$\cos\varphi = \frac{P}{P_a}$$

heißt ***Leistungsfaktor***. Sein Wert zeigt, welchen Bruchteil der vom Generator gelieferten Leistung die aktive Leistung darstellt, also die Leistung, die ein Benutzer verwenden kann.

Die vertikale Kathete $P_r = (U_L - U_C) \cdot I = I^2 (X_L - X_C)$ stellt die Leistung dar, die im Magnetfeld der Spule und im elektrischen Feld zwischen den Platten des Kondensators enthalten ist. Sie heißt ***reaktive Leistung*** und hat gemäß der Abb. 3.3.1 die Formel

$$P_r = P_a \cdot \sin\varphi = U \cdot I \cdot \sin\varphi \,.$$

Die Maßeinheit für die reaktive Leiszung heißt ***Volt-Ampere-reaktiv***, abgekürzt VAR.

Anmerkung: Diese Maßeinheit wurde von der Internationalen Komission für Elektrotechnik im Jahr 1930 angenommen, auf Vorschlag des Akademiemitglieds Constantin Budeanu (1886-1959).

Aus dem Dreieck der Leistungen erhält man leicht auch andere Beziehungen zwischen den 3 Leistungen:

$$P_a^2 = P^2 + P_r^2 \,, \quad P_r = P \cdot \mathrm{tg}\varphi \,.$$

Übung 3.3.1. An die Klemmen eines Reihenstromkreises, gebildet aus einem Widerstand R = 350 Ω, einer Spule mit der Induktivitat $L = 4/\pi$ H und einem Kondensator mit der Kapazität $C = 0{,}2/\pi$ mF, wird eine Wechselspannung $u(t) = 240 \cdot \sin(100\pi \cdot t)$ (V) geschaltet. Bestimme: a) die Gleichung für den Momentanwert der Stromstärke; b) die aktive, die reaktive und die Scheinleistung; c) die Frequenz, bei der Resonanz auftritt; d) die Resonanzstromstärke.

Lösung: Aus der Formel des Momentanwertes der Spannung $u(t) = 240 \cdot \sin(100\pi \cdot t)$ (V) erhält man $\omega = 100\pi$ rad/s. Damit erhält man für die Reaktanzen die Werte

$$X_L = \omega \cdot L = 400\,\Omega \,, \quad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = 50\,\Omega \,.$$

Dementsprechend hat die Impedanz des Stromkreises den Wert

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = 350 \cdot \sqrt{2}\,\Omega \,.$$

Für den Phasenunterschied zwischen der Spannung an den Klemmen des Stromkreises und der Stromstärke erhält man

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = 1 \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{4}.$$

Mit diesen Ergebnissen kann die Gleichung für den Momentanwert der Stromstärke wie folgt geschrieben werden:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U}{Z} \cdot \sin(100\pi \cdot t - \varphi) = \frac{12\sqrt{2}}{35} \cdot \sin\left(100\pi \cdot t - \frac{\pi}{4}\right).$$

Aus dieser Beziehung ist ersichtlich, dass der Effektivwert der Stromstärke I = 12/35 A und aus der Gleichung des Momentanwerts der Spannung folgt, dass der Effektivwert $U = 120\sqrt{2}$ V. Für die Leistungen erhält man

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \approx 41{,}14 \text{ W},$$

$$P_r = U \cdot I \cdot \sin\varphi \approx 41{,}14 \text{ VAR}, \quad P_a = U \cdot I \approx 58{,}18 \text{ VA}.$$

Bei Resonanz erhält man

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \approx 17{,}7 \text{ Hz}, \quad I = \frac{U}{R} \approx 0{,}485 \text{ A}.$$

Übung 3.3.2. Ein Parallelstromkreis *RLC* wird mit einer Wechselspannung vom Effektivwert U = 60 V mit der Frequenz ν = 50 Hz gespeist. Wenn die Indutivität der Spule L = 1 H beträgt, die aktive Leistung P = 10 W und der Phasenunterschied zwischen dem Gesamtstrom und der Spannung $\varphi = \pi/6$ betragt, bestimme: a) den Wert des Widerstands R und der Kapazität C; b) den Momentanwert der Stromstärke in der Spule; c) die Induktivität der Spule, für welche der Gesamtstrom minimal wird und diesen Minimalwert, wenn Frequenz und Kapazität unverändert bleiben.

Lösung: Im Wechselstromkreis wird die aktive Leistung wie folgt bestimmt

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Von hier erhält man

$$R = \frac{U^2}{P} = 360\ \Omega.$$

Aus der Formel des Phasenunterschieds

$$\mathrm{tg}\varphi = R \cdot \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right) = R \cdot \left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right),$$

erhält man

$$C = \frac{1}{\omega} \cdot \left(\frac{\mathrm{tg}\varphi}{R} + \frac{1}{\omega \cdot L}\right) = 15{,}2\ \mu\text{F}.$$

Der Momentanwert der Stromstärke in der Spule ist gegeben mit der Beziehung

$$i_L(t) = \frac{U_m}{X_L} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = 0{,}27 \cdot \sin\left(314t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Die Stromstärke wird minimal bei Resonanz, also

$$X_L = X_C \Rightarrow L' = \frac{1}{\omega^2 C} = 0{,}667 \text{ H}.$$

Dementsprechend beträgt die Resonanzstromstärke

$$I_{\min} = \frac{U}{R} = \frac{P}{U} = 0{,}167 \text{ A}.$$

3.4. Der Transformator und seine Anwendungen

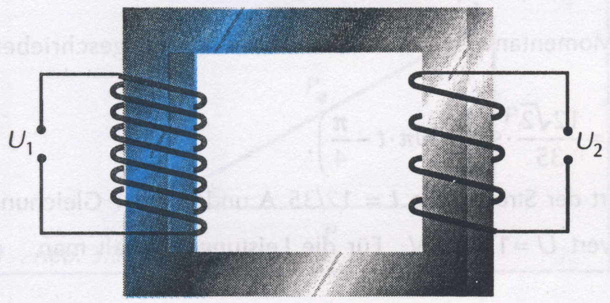


Abb. 3.4.1.

Der effiziente Transport der elektrischen Energie auf große Entfernungen benötigt die Verwendung der Hochspannungen. Tatsächlich können dann (weil $P = U \cdot I$) Ströme von kleinerer Stromstärke benutzt werden, was kleinere Verluste durch Joule-Effekt ($I^2 \cdot R$) auf den Leitungen zur Folge hat.

Andererseits muss beim Anwender die elektrische Energie eine kleine Spannung haben, damit ihre Anwendung nicht gefährlich sei, wie zum Beispiel im Fall der Haushaltsgeräte.

Der Transformator ist ein elektrisches Gerät, das zum Umwandeln der Spannung und der Stromstärke des Wechselstroms verwendet wird.

Im Prinzip besteht ein Transformator aus zwei Spulen, die elektrisch voneinander getrennt sind, beide auf denselben Eisenkern gewickelt (Abb. 3.4.1). Ein Wechselstrom, der durch eine der beiden Spulen fließt, erzeugt im Eisenkern einen veränderlichen Magnetfluss, welcher seinerseits in der zweiten Spule das Auftreten einer induzierten elektromotorischen Wechselspannung bewirkt. In dieser Weise wird die elektrische Energie aus der einen in die andere Spule übertragen. Diejenige Spule, der die elektrische Leistung zugeführt wird, heißt ***Primärspule oder Primärwicklung*** und diejenige, welche die Leistung abgibt, heißt ***Sekundärspule oder Sekundärwicklung***.

Anmerkung: Der Transfer der Energie von der Primär- zur Sekundärspule ist von einigen Verlusten begleitet, wie es, zum Beispiel, die Verluste durch Joule-Effekt in den beiden Spulen sind. Aber die Verluste sind relativ gering und der Wirkungsgrad des Transformators ist gewöhnlich größer als 95%.

3

Um die Überlegungen zu vereinfachen, nehmen wir im Folgenden an, dass der Transformator keine Verluste hat. Wir nehmen an, dass die Primärspule N_P Windungen und die Sekundärspule N_S Windungen hat. Die Wechselspannungsquelle mit der Spannung U_P ist an die Primärspule geschaltet. Der Sekundärstromkreis sei offen, so dass es im Sekundärkreis keinen Strom gibt. Man sagt, dass der Transformator im Leerlauf funktioniert.

Weil derselbe Magnetfluss sowohl den Primär-, als auch den Sekundärkreis durchsetzt, ist die induzierte elektromotorische Spannung für eine Windung auf jeder Seite dieselbe. Die Spannungen, die in die Primär-, bzw. in die Sekundärspule induziert werden, sind gegeben durch die Beziehungen:

$$e_p = -N_p \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad e_s = -N_s \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Durch Dividieren erhält man

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s}.$$

Die Wicklungen des Transformators wurden als ideal angenommen (die Verluste durch Joule-Effekt gleich Null). Deshalb sind die Spannungen an den Klemmen U_P und U_S gleich mit den induzierten elektromotorischen Spannungen e_P und e_S. Die vorige Beziehung kann dann wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Schlussfolgerung: Beim Leerlauf des Transformators (Sekundärstromkreis offen) *sind die Spannungen direkt proportional mit den entsprechenden Windungszahlen.*

Es ist somit ersichtlich, dass man für eine Sekundärspule mit mehreren Windungen als die der Primärspule ($N_s > N_p$) eine größere Spannung erhält ($U_S > U_P$). Es handelt sich in diesem Fall um einen Aufwärtstransformator. Wenn $N_P > N_S$ erhält man sekundärseitig eine kleinere Spannung ($U_P > U_S$). Dieser Transformator heißt *Abwärtstransformator.*

Wenn der Sekundärstromkreis mit einem Widerstand R geschlossen wird, fließt durch diesen Stromkreis ein Strom $I_S = U_S/R$. Weil die Verluste als vernachlässigbar angenommen wurden, folgt aus dem Gesetz der Erhaltung der Energie, dass die vom Sekundärkreis erhaltene Leistung gleich ist mit der vom Primärkreis abgegebenen Leistung. Also

$$U_s \cdot I_s = U_p \cdot I_p$$

und mit der Beziehung für den Leerlauf des Transformators erhalten wir:

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}.$$

Die Transformatoren haben eine Vielzahl von Anwendungen, die alle auf ihrer Fähigkeit beruhen, die Spannung beim Wechselstrom zu erhöhen oder zu senken. In den elektrischen Kraftwerken wird die elektrische Energie mit einer Spannung von 6 kV erzeugt; Transformatoren heben die Spannung auf Hunderte von Kilovolt, was für den Transport günstig ist (geringe Verluste auf den Leitungen), und schließlich sind es wieder Transformatoren, welche die Spannung in Stufen herabsetzen, z.B. bis auf 220 V für den Hausgebrauch.

Transformatoren werden auch in vielen Haushaltsgeräten angewendet: Radio, Fernseher, Tonbandgerät, Telefon, etc., um die Spannung auf den für den Betrieb nötigen Wert herabzusetzen. Eine andere wichtige Anwendung der Transformatoren ist die Zündspule beim Auto, die benötigt wird, um die für die Zündung bei Motoren mit Funkenzündung notwendige Spannung zu erzielen.

LABORATORIUMSARBEIT
Das experimentelle Studium eines elektrischen Transformators

Der Transformator, ein Gerät zum Verändern der elektrischen Spannung und der Stromstärke, ist ein Quadripol (Vierpol). Das Symbol ist in der Abb. L 3.4.1 zu sehen. An den Klemmen der Primärspule erhält er Energie und gibt sie an den Klemmen der Sekundärspule ab.

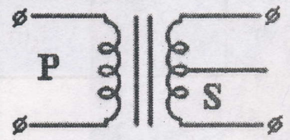


Fig. L 3.4.1

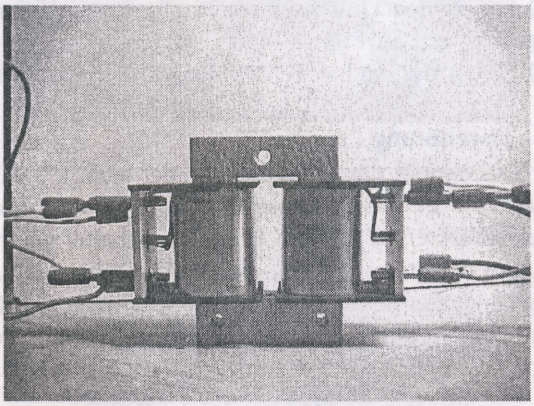


Abb. L 3.4.2

Das Übersetzungsverhältnis ist definiert als Verhältnis der Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule, gleich mit dem Verhältnis der Spannungen und mit dem umgekehrten Verhältnis der Stromstärken:

$$k = \frac{N_P}{N_S} = \frac{U_P}{U_S} = \frac{I_S}{I_P}$$

Nach dem Wert des Übersetzungsverhältnisses können die Transformatoren eingeteilt werden in:
- Aufwärtstransformatoren, wenn k< 1;
- Abwärtstransformatoren, wenn k> 1;
- Trenntransformatoren, mit der Funktion, eine Gleichstromkomponente zu eliminieren, wenn k=1.

Der Energietransfer aus dem Primärkreis in den Sekundärkreis geschieht mit Energieverlust. Das Verhältnis aus der gelieferten und der erhaltenen Leistung definiert den Wirkungsgrad des Transformators:

$$\eta = P_P/P_S = U_S I_S / U_P I_P \quad [\%]$$

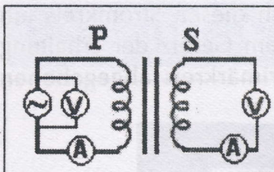


Abb. L 3.4.3

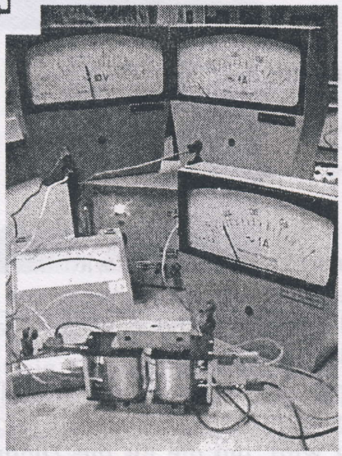


Abb. L 3.4.4

Durchführung

Ihr baut einen Transformator zusammen, indem ihr die Materialien aus der Gerätesammlung verwendet: 2 Spulen 2x250 Windungen, Eisenkern von U und I Form, Wechselspannungsquelle, zwei Amperemeter ~ 0 – 1 A, zwei Voltmeter ~ 0 – 10 V, Widerstand von 100Ω, Verbindungsdrähte.

Baut den Stromkreis aus der Abb. L 3.4.3 auf, schließt die Messgeräte an, wartet bis der Lehrer die Schaltung überprüft hat und speist dann die Primärspule. Messt die von den Voltmetern angezeigten Spannungen für verschiedene Werte der Primärspannung, beim Leerlauf des Transformators (ohne Lastwiderstand im Sekundärkreis). Ändert die Windungszahl bei der Primärspule und bei der Sekundärspule, um die drei Arten von Transformatoren zu erhalten.

Schreibt die erhaltenen Daten in die folgende Tabelle und berechnet die Werte für das Übersetzungsverhältnis bei den verwendeten Transformatoren.

Nr.	N_P	N_S	U_P(V)	U_S(V)	$k= N_P/ N_S$	$k= U_P/ U_S$

Um den Wirkungsgrad des Transformators zu bestimmen, schließt den Sekundärkreis mit einem Widerstand. Messt die von den Messgeräten angezeigten Werte für verschiedene Werte der Primärspannung. Schreibt die erhaltenen Daten in die folgende Tabelle und berechnet den Wirkungsgrad des Transformators.

Nr.	U_P(V)	U_S(V)	I_P(mA)	I_S(mA)	$\eta = U_S I_S / U_P I_P$

Schlussfolgerungen:

1) Erklärt den Unterschied zwischen dem Verhältnis der Windungszahlen und dem Verhältnis der gemessenen Spannungen an Primär- und Sekundärspule,
2) Findet die wichtigsten Fehlerquellen und schlagt Lösungen für ihre Vermeidung vor.

Erweiterung

Verwendet die Schaltung aus der Abb. L 3.4.3 (ohne den Lastwiderstand im Sekundärkreis des Transformators) und legt eine bestimmte Spannung U_1 an der Primärspule fest. Lest die Anzeige des Voltmeters aus dem Sekundärkreis $U_{2\ \text{leer}}$ (im Leerlauf). Schaltet einen veränderlichen Widerstand an die Sekundärseite und messt die Werte der Stromstärke I_2 und der Spannung U_2 auf dem Widerstand für verschiedene Werte dieses Widerstands. Zeichnet das Schaubild der Abhängigkeit $U_2 = U_2(I_2)$. Dieses Schaubild ist die Ausgangskennlinie des Transformators mit resistivem Verbraucher. Nehmt dann eine Spule in Reihe mit dem Widerstand und wiederholt die Messungen von vorher, um so die Ausgangskennlinie des Transformators mit induktiver Last zu finden.

3.5. Elektromotoren

Elektromotoren sind Maschinen, welche die elektrische Energie in mechanische Energie umwandeln. Die Motoren haben im Prinzip denselben Aufbau wie die elektrischen Generatoren. Während bei den Generatoren der Rotor von einem Luft- oder Wasserstrom in Bewegung gesetzt wird, um einen elektrischen Strom zu induzieren (Abb. 3.5.1), wird der Stator der Motoren mit elektrischem Strom gespeist, um somit eine Bewegung des Rotors zu erzeugen, der dann seinerseits einen Propeller oder einen Zahnradmechanismus antreibt (Abb. 3.5.2).

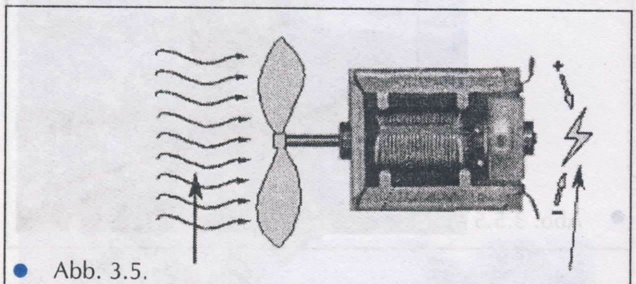


Abb. 3.5.

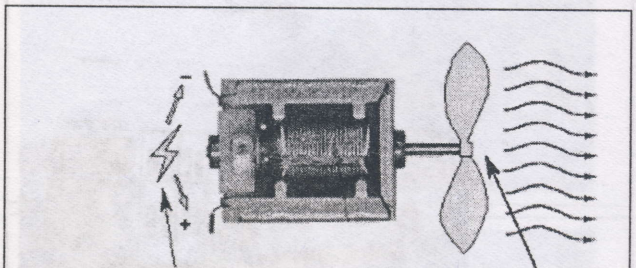


Abb. 3.5.2

Der Asynchronmotor ist ein Wechselstrommotor, bei dem das Magnetfeld des Stators die Drehbewegung des Rotors, auf Grund der Wechselwirkung mit dem in den Rotor induzierten Strom erzeugt. Der Stator ist identisch mit demjenigen des Dreiphasenstromgenerators. Das rotierende Magnetfeld (Drehfeld) wird mit Hilfe von drei Spulen erzeugt, die gegeneinander um jeweils 120° versetzt angeordnet sind und die vom Dreiphasenstrom gespeist werden. Während des Betriebs hat der Rotor eine kleinere Drehzahl als das magnetische Drehfeld. Der Rotor kann die Drehzahl des Feldes nicht erreichen, weil das ein Verschwinden der Antriebskraft bedeuten würde. Es gibt Asynchronmotoren mit Kurzschlussrotor, den man Käfiganker nennt (Abb. 3.5.3), bestehend aus Kupfer- oder Aluminiumstäben, die an den Enden mit Aluminiumringen kurzgeschlossen sind.

Diese Motoren finden breite Anwendung, weil sie ihre Drehzahl auch bei veränderlicher Last fast unverändert beibehalten. Sie haben einen einfachen Aufbau, ohne Schleifkontakte. Ihr Nachteil besteht darin, dass sie beim Start einen sehr starken Strom aufnehmen. Es gibt auch Motoren mit gewickeltem Rotor und mit Kollektorringen.

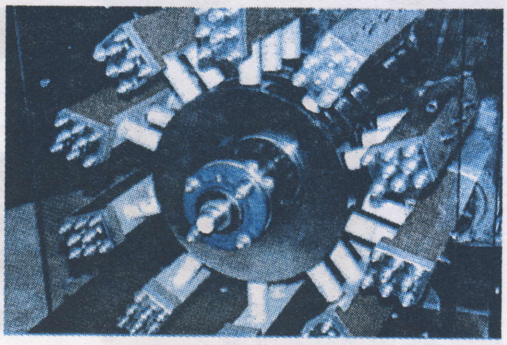


Abb. 3.5.3

Synchronmotoren haben eine konstante Drehzahl, die unabhängig von der Last ist. Der Stator ist so wie beim Asynchronmotor gebaut. Die Rotorwicklung wird mit Gleichstrom über die Kollektorringe gespeist.

Der Gleichstrommotor

Die Gleichstromgeneratoren sind reversibel; wenn sie mit Gleichstrom gespeist werden, absorbieren sie elektrische Energie und erzeugen mechanische Arbeit. In der Abb. 3.5.4 ist der Aufbau eines Gleichstrommotors zu sehen: der Kollektor hat dabei mehrere Schlitze.

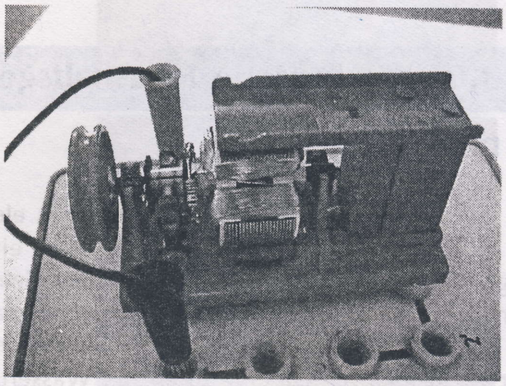


Abb. 3.5.4

Motoren mit Hauptschluss sind ähnlich den Hauptschlussgeneratoren, wo die Statorwicklungen ihren Strom aus dem Rotor beziehen. Sie haben den Vorteil eines großen Anlaufstromes.

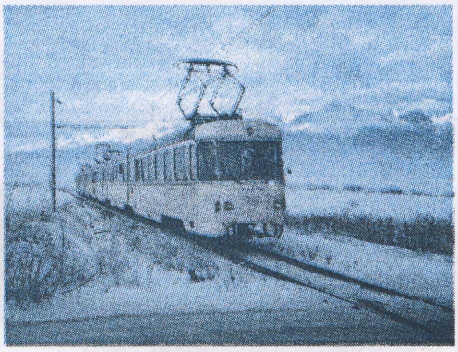


Abb. 3.5.5

Abb. 3.5.6

Abb. 3.5.7

Sie werden bevorzugt dort angewendet, wo ein großes Anlaufdrehmoment gefragt ist, bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen: Straßenbahnen, Lokomotiven, Trolleybusse. Diese Motoren müssen ständig eine Last angeschaltet haben, weil sonst ihre Drehzahl sehr schnell bis zur Zerstörung steigen würde. Ihre Drehzahl verändert man durch Einfügen von Widerständen, die in Reihe mit dem Motor geschaltet sind. Im Falle der elektrischen Fahrzeuge verwendet man zwei parallel geschaltete Motoren um ihre Drehzahl zu verändern. Sie haben großen Wirkungsgrad und gute Störsicherheit.

Wie funktioniert der Stromkreis der Speisespannung des Motors im Falle der Straßenbahn, der elektrischen Lokomotive, des Trolleybusses?

Die Motoren mit Nebenschlußerregung verwendet man bei Geräten, bei denen die konstante Drehzahl wichtig ist: Pumpen, Drehbänke, etc.

Die Gleichstrommotoren können auch mit Wechselstrom betrieben werden, aber nur bei kleinen Leistungen: Staubsauger, Ventilatoren, Bohrmaschinen von kleiner Leistung, etc.

Die normalen Betriebswerte, aufgedruckt auf dem Erkennungsschild eines Elektromotors, sind:

- die Nennleistung – die nützliche mechanische Leistung an der Motorachse:

$$[P_n]=1W$$

- die Nennspannung – die Speisespannung:

$$[U]=1V$$

- der Nennstrom – der vom Netz absorbierte Strom bei normalem Betrieb:

$$[I]=1A$$

- die Nenndrehzahl – die Drehzahl der Motorachse:

$$[\nu]=1Rot/Min$$

- der Wirkungsgrad des Motors – der Quotient aus der Nennleistung des Motors und der vom Netz aufgenommenen elektrischen Leistung:

$$\eta < 1.$$

3.6. Elektrische Haushaltsgeräte

Die Waschmaschine

Sie erfüllt mehrere Funktionen:

- Erwärmen des Wassers mit Hilfe eines elektrischen Widerstands von großer Leistung,
- Waschen der Wäsche durch Rotation einer Trommel, die von einem Elektromotor von großer Leistung angetrieben wird (Abb. 3.6.2), mittels einer Getriebeschaltung. Diese regelt die Drehzahl der Trommel in Funktion der Wäschemenge und der Art des Waschvorgangs und treibt die Wasserpumpe der Maschine an.
- Schleudern der Wäsche durch Rotation der Trommel (die mit Öffnungen versehen ist). Gemäß dem Prinzip der Zentrifugalschleuder werden die Wassertropfen aus der Wäsche unter dem Einfluss der Zentrifugalkraft herausgeschleudert und verlassen die Trommel (Abb. 3.6.1)

Der Staubsauger

Die Hauptkomponente des Staubsaugers (Abb. 3.6.3) ist der Elektromotor mit der Leistung von 700 – 1600W, welcher den Ventilator antreibt. Dieser erzeugt einen Luftstrom. Das Ansaugen von Staub und Fusseln geschieht in Folge eines inneren Unterdrucks. So lange der Luftdruck im Inneren des Staubsaugers kleiner ist als draußen wird die umgebende Luft durch die Eintrittsöffnung eingesaugt. Der Luftstrom verläuft durch den Staubfilter, welcher die Staubteilchen und Fremdkörper zurückhält. Die Saugkraft des Staubsaugers kann mittels eines Potentiometers, das die Leistung des Motors beeinflusst, geregelt werden.

Der Haartrockner

Er wird verwendet, um einen warmen Luftstrom zu erzeugen, welcher das Verdunsten der Wassertropfen von den Haaren beschleunigt. Der Temperaturanstieg, bewirkt durch den warmen Luftstrom, beschleunigt den Übergang des Wassers aus dem flüssigen in den gasförmigen Zustand, was zum Trocknen der Haare führt.

Die wichtigsten Komponenten sind das Heizelement (großer Widerstand) und der Ventilator (ein Flügelrad, angetrieben von einem kleinen Elektromotor) (Abb. 3.6.4). Der vom Ventilator erzeugte und vom Heizelement erwärmte Luftstrom kann mittels eines Kippschalters geregelt werden. Der Haartrockner enthält auch einen Bimetallschalter, welcher die Erwärmung über 60°C durch Öffnen des Stromkreises vermeidet. Dieser funktioniert als Thermostat. Das Heizelement besteht aus einer Nickel-Chrom-Legierung, die man Chromnickel nennt. Diese hat einen großen spezifischen Widerstand und oxydiert beim Erwärmen nicht.

Zu derselben Gruppe der Haushaltsgeräte gehören der Händetrockner und der Wäschetrockner.

Die elektrische Heizplatte

Sie wird zum Kochen, zum Brotrösten, zum Waffelnherstellen oder zum Erwärmen von Sandwiches verwendet. Das Gerät beruht auf dem Joule-Effekt (Abb. 3.6.5). Das Heizelement hat eine große elektrische Leistung (700 – 1400 W) um die gußeiserne Platte zu erwärmen. Es besteht ebenfalls aus Chromnickel. Die Funktin wird von einem Bimetallschalter gesteuert, welcher den Stromkreis öffnet, wenn die Temperatur den zugelassenen Wert erreicht hat.

Ein ähnliches Heizgerät mit dem aus der Abb. 3.6.5 haben auch die elektrischen Kaffemaschinen. Die elektrischen Bratöfen funktionieren nach demselben Prinzip, haben aber Widerstände von noch größerer Leistung (Tausende von Watt).

Abb. 3.6.1

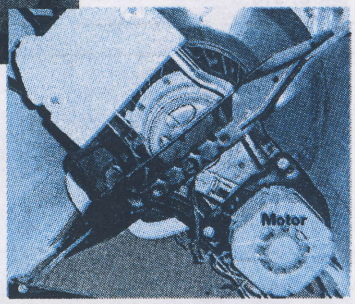


Abb. 3.6.2

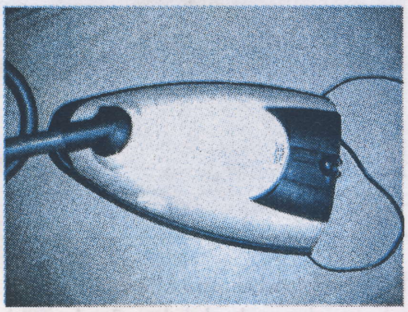


Abb. 3.6.3

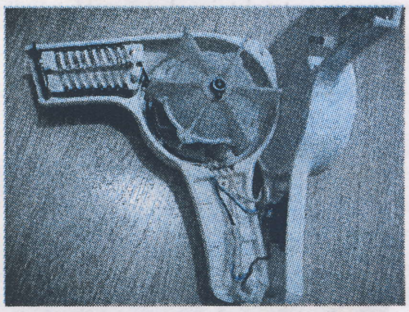


Abb. 3.6.4

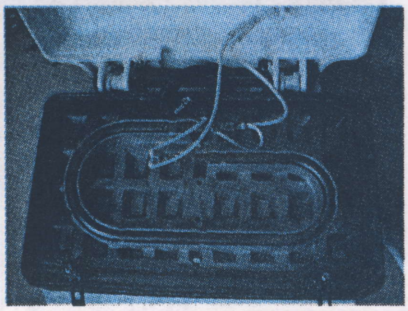


Abb. 3.6.5

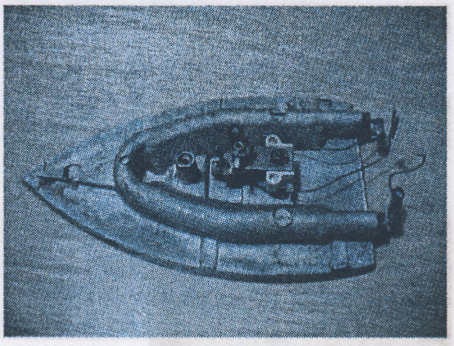


Abb. 3.6.6

Das Bügeleisen

Es hat als wichtigsten Teil auch ein Heizelement mit großer Leistung (1000 – 2000 W), das die Bodenplatte des Bügeleisens erwärmt. Seine Temperatur kann entsprechend dem zu bügelnden Material eingestellt werden. Sie wird mittels eines Thermostats konstant gehalten- ein Bimetallschalter, der die übermäßige Erwärmung des Bügeleisens durch Öffnen des Stromkreises verhindert. Einen ähnlichen Aufbau haben der elektrische Kocher und der Haarweller.

Abb. 3.6.7

Geräte zur Übertragung, zur Aufnahme und zur Wiedergabe von Tönen

Das Mikrofon

Das Mikrofon wandelt die Druckschwankungen, die bei der Emission der Töne auftreten, in entsprechende Schwankungen der Stromstärke um. Diese können nachträglich von einem Lautsprecher wieder in Töne umgewandelt werden. In jeder Konstruktionsvariante (Kohlekörnermikrofon, elektrodynamisches Mikrofon, Kondensatormikrofon, Kristallmikrofon) ist die wichtigste Komponente eine Membran, die entsprechend der Lautstärke und der Tonhöhe der Töne vibriert. Im Fall des Kohlekörnermikrofons wirkt diese auf die feinen Kohlepartikel und ändert deren Kontaktwideratände, so dass sich die Stromstärke im Stromkreis verändert. Bei Druck auf die Membran wird die Stromstärke größer und beim Nachlassen des Drucks wird sie kleiner.

Das elektrodynamische Mikrofon (Abb. 3.6.7) ist heute am meisten verbreitet. In diesem Fall bewegt die Membran eine sehr leichte Spule (Abb. 3.6.8-a), die sich im Luftspalt eines Magneten befindet. Während ihrer Bewegung entsteht in der Spule ein induzierter Strom, dessen Stärke von der Geschwindigkeit der Bewegung abhängt (Abb. 3.6.8-a,b).

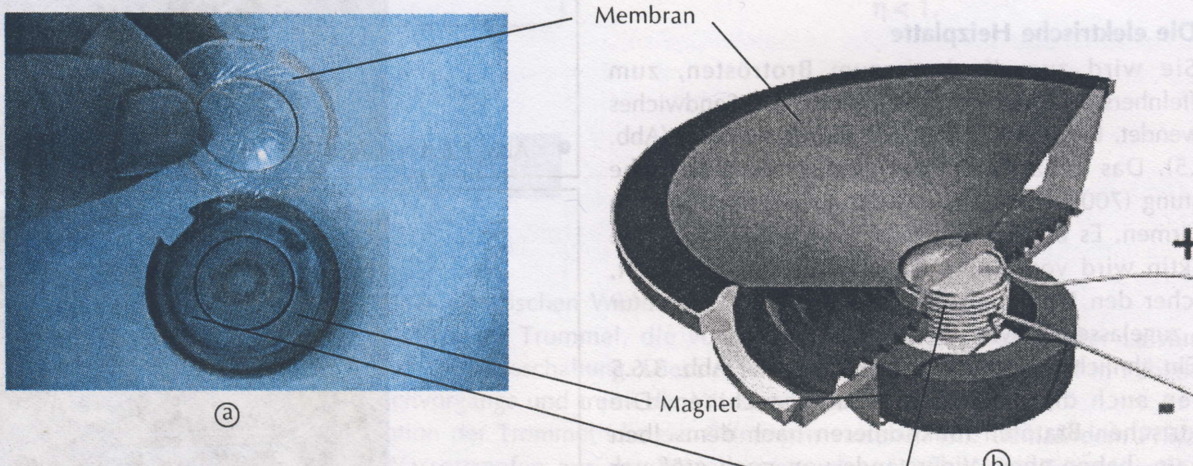


Abb. 3.6.8

Der Lautsprecher

Die Wiedergabe der vom Mikrofon in Stromschwankungen umgewandelten Töne kann mit einem Lautsprecher erzielt werden (Abb. 3.6.9). Sein Funktionsprinzip ist dasselbe wie beim elektrodynamischen Mikrofon, nur dass hier die Stromschwankungen von der beweglichen Spule aufgenommen werden, die dann die Membran des Lautsprechers bewegt. Diese erzeugt dadurch die gleichen Töne, wie die von der Membran des Mikrofons empfangenen Töne.

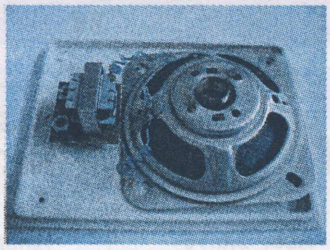


Abb. 3.6.9

Das Kasettentonbandgerät

Wenn zwischen Aufnahme und Wiedergabe die Speicherung der Töne erwünscht ist, kann ein Magnetband verwendet werden, das früher in Tonbandgeräten beschrieben und gelesen wurde, heute aber in Kasettengeräten.

Die Kasetten (Abb. 3.6.10) enthalten das Magnetband, auf welches die Töne mit Hilfe eines Tonkopfs (ein Elektromagnet) aufgenommen werden. Das Band wird mit konstanter Geschwindigkeit vor dem Aufnahmekopf vorbeigeführt (Abb. 3.6.11), durch dessen Spule der vom Mikrofon erzeugte veränderliche Strom fließt. Somit wird das Band die Töne durch Regionen mit verschieden starker Magnetisierung festhalten. Bei der Wiedergabe wird das Band mit der gleichen Geschwindigkeit wie bei der Aufnahme an einem anderen Kopf (Elektromagneten) vorbeigeführt. In Folge des Vorbeilaufs der Regionen mit verschiedener Magnetisierung ist der Magnetfluss durch die Spule des Wiedergabekopfes veränderlich und es entsteht somit ein induzierter Strom, identisch mit dem Strom von der Aufnahme. Er wird dann verstärkt und dem Lautsprecher zugeleitet. Wenn das Band gelöscht werden soll, wird es entweder sehr stark mit Gleichstrom magnetisiert oder mit hochfrequentem Wechselstrom entmagnetisiert.

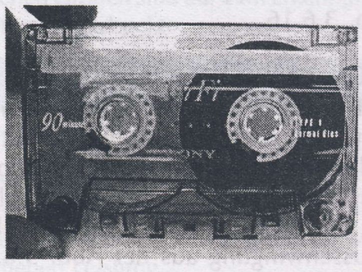


Abb. 3.6.10

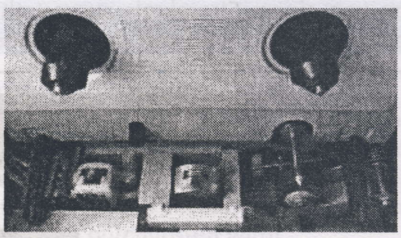


Abb. 3.6.11

Das Telefon.

Es ist ein Gerät, dessen Anschluss an das Telefonnetz sich in den letzten 100 Jahren nicht verändert hat. Im Telefonapparat ist ein Mikrofon, zusammen mit einer Gleichspannungsquelle, an die Primärseite eines Aufwärtstransformators geschaltet und ein Lautsprecher an die Sekundärseite. Zwei solche Apparate werden so zusammen geschaltet, dass die Lautsprecher in Reihe mit den beiden Transformatoren liegen (Abb. 3.6.12); das ist das einfachste Telefonnetz und es kann ein Telefongespräch stattfinden. Das Prinzip der Festtelefonie ist das Gleiche geblieben, aber der technologische Fortschritt hat sich zu Wort gemeldet.

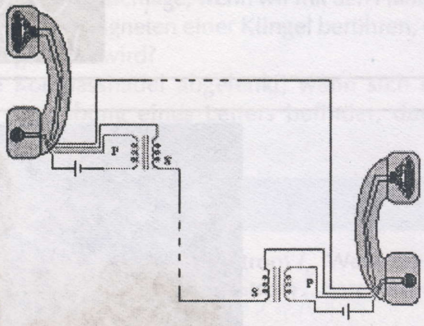


Abb. 3.6.12

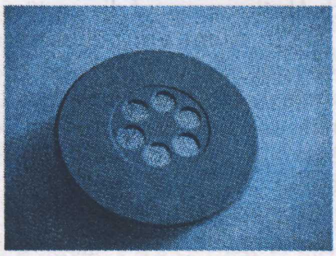


Abb. 3.6.13

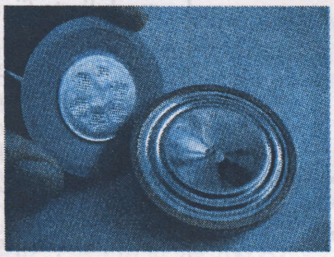


Abb. 3.6.14

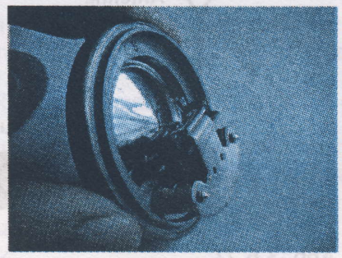


Abb. 3.6.15

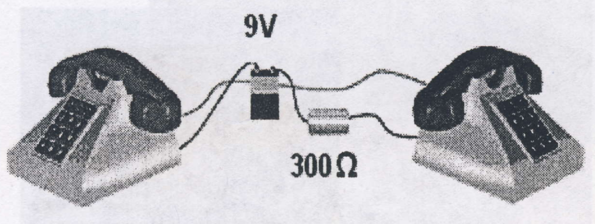


Abb. 3.6.16

In den modernen Telefonapparaten wurde das Kohlekörnermikrofon durch ein elektronisches Mikrofon ersetzt. Auch die Tonspule ist verschwunden (Abb. 3.6.13, 3.6.14 und 3.6.15). An ihre Stelle ist ein kleiner Verstärker getreten.

Das aktuelle Telefonnetz verwendet einen etwas komplizierteren Stromkreis, der eine Telefonzentrale enthält, die mit Hilfe von Automaten die elektrischen Impulse zwischen den Teilnehmern vermittelt. Ihr könnt selber ein einfaches Telefonnetz aufbauen, indem ihr zwei Telefonapparate mit einer Batterie von 9 V und einem Widerstand von 300 Ω in Reihe schaltet, wie in der Abb. 3.6.16.

Das Radio

Das elektrische Signal, das durch Umwandlung der Tonsignale mit Hilfe eines Mikrofons erhalten wurde, kann auf große Entfernungen drahtlos übertragen werden. Dafür benötigt man einen Sender – die Radiostation, und einen Empfänger – der Radioapparat. Wie ist die Umwandlung des elektrischen Signals in etwas Anderes, das den Raum durchqueren kann, möglich? Der Ton ist eigentlich eine Welle, eine Schwingung, die sich in der Luft von Punkt zu Punkt ausbreitet. In ähnlicher Weise breitet sich auch das Licht aus. Eine solche Schwingung ist die Sinusschwingung aus der Abb. 3.6.17. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde ist die Frequenz. Wenn die Frequenz sich im Bereich der MHz (10^6 Hz) befindet, dann spricht man vom Radiofrequenzbereich. Die Sinuswelle kann von einem Stromkreis ausgestrahlt werden, der einen Kondensator und eine Spule enthält und Schwingkreis genannt wird. Er wird mit der Antenne der Radiostation verbunden.

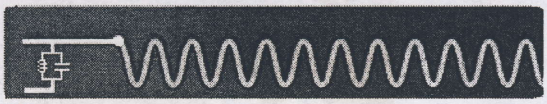


Abb. 3.6.17

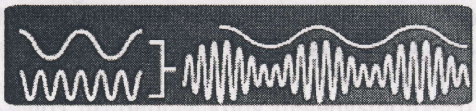


Abb. 3.6.18

Abb. 3.6.19

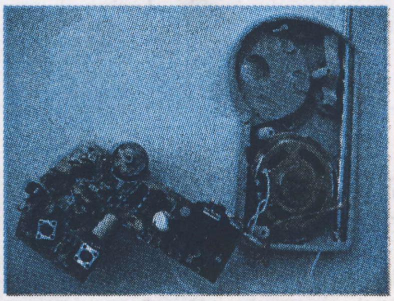


Abb. 3.6.20

Was geschieht mit den Tönen in der Radiostation? Sie werden vom Mikrofon in einen veränderlichen Strom umgewandelt. Dieses elektrische Signal kann dem vorher beschriebenen Sinussignal überlagert werden und man erhält die Signale aus den Abb. 3.6.18 und 3.6.19. Der Vorgang heißt Modulation; man unterscheidet Amplitudenmodulation (Abb. 3.6.18) und Frequenzmodulation (Abb. 3.6.19). Man benötigt dafür besondere Schaltungen.

Die nach der Modulation erhaltenen Signale breiten sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit aus und können mit einem Radioapparat empfangen werden (Abb. 3.6.20), der auf die Frequenz des gewünschten Senders abgestimmt ist.

Der Radioapparat enthält eine Antenne, die das modulierte Signal durch Abstimmung auf die gewünschte Frequenz empfängt. Dafür dient ein Schwingkreis, gebildet aus einer Spule und einem Drehkondensator. Das Signal wird demoduliert, das heißt, man trennt das Trägersignal vom Signal, das den Ton erzeugen wird. Das vereinfachte Schema eines Radioempfängers ist in der Abb. 3.6.20 dargestellt.

Das vom Trägersignal abgetrennte elektrische Signal wird danach verstärkt und einem Lautsprecher zugeführt (Abb. 3.6.21), wo es in Töne umgewandelt wird.

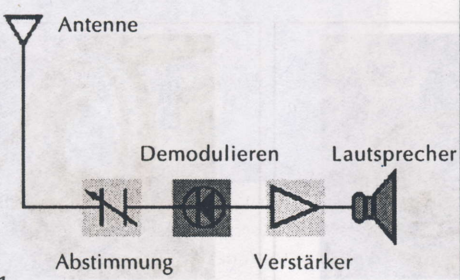


Abb. 3.6.21

ZUR BEWERTUNG

Formuliert Antworten auf die folgenden Fragen:

1. Was nennt man Effektivstromstärke des Wechselstroms?
2. Welches ist die Formel des Effektivwertes der Spannung?
3. Welche Formeln haben kapazitive und induktive Reaktanz?
4. Welche Formel hat die Impedanz des Reihenstromkreises RLC?
5. Welche Formel hat die Resonanzfrequenz?
6. Was versteht man unter dem Gütefaktor des RLC-Stromkreises?
7. Welche Formel hat der Phasenunterschied im RLC-Stromkreis?
8. Was ist die Scheinleistung?
9. Was ist der Leistungsfaktor?
10. Welche physikalischen Größen sind auf dem Erkennungsschild eines Elektromotors aufgedruckt.

Bewertet mit richtig oder falsch:

1. Der Widerstand erzeugt im Wechselstromkreis keinen Phasenunterschied zwischen Spannung und Stromstärke.
2. Die Spulen haben praktisch einen vernachlässigbaren elektrischen Widerstand.
3. Ein RLC-Parallelstromkreis nimmt bei Resonanz einen minimalen Strom auf.
4. Die Scheinleistung wird in VAR gemessen.
5. Der Wirkungsgrad eines Transformators ist das Verhältnis aus der im Sekundärkreis abgegebenen Leistung und der vom Primärkreis aufgenommenen Leistung.

Erklärt mit Hilfe der Gesetze aus diesem Kapitel:

1. Warum besteht die Gefahr des Elektroschocks nicht, wenn man beide Schienen der Straßenbahnlinie berührt, obwohl durch diese Ströme von großer Stromstärke fließen?
2. Was zeigt ein Messgerät mit beweglicher Spule und Dauermagnet an, wenn es im Wechselstromkreis verwendet wird?
3. Warum erleiden Spatzen keinen elektrischen Schock, wenn sie auf den Hochspannungsleitungen sitzen, während Störchen dieses passiert?
4. Warum besteht die Gefahr des Elektroschocks, wenn man auch nur einen Pol der Steckdose des Wechselstromnetzes berührt?
5. Was geschieht, wenn man einen Transformator nicht mit Wechselstrom, sondern mit Gleichstrom speist?
6. Warum zeigt ein gewöhnlicher Stromzähler keinen Verbrauch bei einem Klingeltransformator an, solange die Klingel nicht funktioniert?
7. Warum erzeugt ein Transformator ein Brummgeräusch, wenn die Primärspule vom Strom durchflossen wird?
8. Warum erhalten wir Stromschläge, wenn wir mit den Händen die Klemmen des Elektromagneten einer Klingel berühren, die von einer Batterie gespeist wird?
9. Wie wird die Kompassnadel abgelenkt, wenn sich der Kompass in der Umgebung eines Leiters befindet, durch welchen Wechselstrom fließt?

Aufgaben

1. Eine Spule, die an eine Gleichspannungquelle mit der Spannung U_c angeschlossen wird, führt einen Strom I_c. Wenn sie an eine Wechselspannungsquelle mit der Spannung U und mit der Frequenz ν angeschlossen wird, fließt ein Strom I. Berechne die Induktivität L der Spule.
Zahlenbeispiel: $U_c = 24$ V; $I_c = 4$ A; $U = 120$ V; $\nu = 50$ Hz; $I = 12$ A. R: L = 25,5 mH.

2. An die Klemmen einer Wechselspannungsquelle mit der Spannung U wird ein Reihenstromkreis, gebildet aus einem Kondensator mit der Kapazität C und einer Spule mit der Induktivität L und dem Widerstand R, geschaltet. Berechne: a) die Stromstärke I, wenn die Frequenz des Stromes ν beträgt; b) die Frequenz ν_0 für Resonanz; c) die Stromstärke I_0 bei Resonanz; d) den Gütefaktor des Stromkreises.
Zahlenbeispiel: $U = 10$ V; $C = 5 \cdot 10^{-5}/\pi$ F; $L = 2/\pi$ H; $R = 40\ \Omega$; $\nu = 100$ Hz. R: $I = 33$ mA; $\nu_0 = 50$ Hz; $I_0 = 0{,}25$ A; $Q = 5$.

3. Ein Reihenstromkreis besteht aus einer Spule mit der Induktivität L, einem Widerstand R und einem Kondensator mit der Kapazität C. Berechne: a) die Resonanzpulsation ω_0; b) die kapazitive Reaktanz bei Resonanz X_{C0}; c) den Phasenunterschied φ zwischen Stromstarke und Spannung an den Enden des Stromkreises für die Frequenz ν.
Zahlenbeispiel: $L = 0{,}1$ mH; $R = 15\ \Omega$; $C = 1\ \mu$F; $\nu = (100/\pi)$ kHz. R: $\omega_0 = 10^5$ rad/s; $X_{C0} = 10\ \Omega$; $\varphi = 45°$.

4. Ein Reihenstromkreis RLC ist gebildet aus einem Widerstand R, einer Spule mit der Induktivität L und einem Kondensator mit der Kapazität C. Er wird mit der Effektivspannung U bei der Frequenz ν gespeist. Berechne: a) die Stromstärke I; b) die maximalen Spannungen an den Klemmen des Widerstands, der Spule und des Kondensators; c) den Phasenunterschied φ zwischen der Spannung an den Enden des Stromkreises und der Stromstärke; d) die Resonanzfrequenz ν_0.
Zahlenbeispiel: $R = 4\ \Omega$; $L = 6{,}37$ mH; $C = 159\ \mu$F; $U = 120$ V; $\nu = 200$ Hz.
R: $I = 24$ A; $U_{Rm} = 135{,}7$ V; $U_{Lm} = 271{,}5$ V; $U_{Cm} = 169{,}7$ V; $\mathrm{tg}\,\varphi = 0{,}75$; $\nu_0 = 158{,}2$ Hz.

5. Ein Reihenstromkreis gebildet aus Spule und Kondensator wird an eine Spannung U geschaltet. Die beiden Elemente haben die gleiche Impedanz. Der Phasenunterschied zwischen der Spannung an den Klemmen der Spule U_b und der Stromstärke ist φ_b. Berechne den Phasenunterschied φ fur den gesamten Stromkreis.
Zahlenbeispiel: $\varphi_b = 30°$. **R: $\varphi = 30°$.**

6. Eine ideale Spule und ein Widerstand sind in Reihe geschaltet und werden von der Wechselspannung U mit der Frequenz ν gespeist, wobei die Stromstarke I beträgt. Wenn in Reihe noch ein Kondensator mit der Reaktanz X_C eingefügt wird, erhält man Resonanz. Berechne: a) den Widerstand R, die Induktivität L und die Kapazität C; b) die Resonanzstromstärke; c) den Leistungsfaktor, $\cos\varphi$ (fur den Stromkreis ohne und mit Kondensator).
Zahlenbeispiel: $U = 120$ V; $\nu = 50$ Hz; $I = 24$ A; $X_C = 4\ \Omega$. **R: $R = 3\ \Omega$; $L = 12{,}7$ mH; $C = 796\ \mu$F; $I_m = 40$ A; $\cos\varphi = 0{,}6$; $\cos\varphi = 1$.**

7. Ein Kondensator ist in Reihe geschaltet mit einer Spule, die den Widerstand R und die Reaktanz X_L hat. Die Spannung an den Klemmen der Spule ist gleich mit der Spannung an den Klemmen des Kondensators. Berechne: a) die Reaktanz des Kondensators X_C; b) den Leistungsfaktor, $\cos\varphi$.
Zahlenbeispiel: $R = 7\ \Omega$; $X_L = 24\ \Omega$. **R: $X_C = 25\ \Omega$; $\cos\varphi = 0{,}9899$.**

8. Ein RLC-Reihenstromkreis besteht aus einem Widerstand R, einer Spule mit der Induktivität L und einem Kondensator mit der Kapazität C. Berechne: a) die Resonanzpulsation ω_0; b) die Impedanz Z des Stromkreises, wenn die Frequenz ν beträgt; c) die Frequenz ν', für welche der Phasenunterschied zwischen Stromstärke und Spannung an den Klemmen des Stromkreises φ beträgt.
Zahlenbeispiel: $R = 150\ \Omega$; $L = 10^{-2}$ H; $C = 1\ \mu$F; $\nu = 10^3/\pi$ Hz; $\varphi = \pi/4$. **R: $\omega_0 = 10^4$ rad/s; $Z = 502{,}9\ \Omega$; $\nu' = 10/\pi$ kHz.**

9. Ein Widerstand R, an die Klemmen einer Wechselspannungsquelle der Frequenz ν angeschlossen, wird vom Strom I_0 durchflossen. Es wird parallel mit dem Widerstand eine ideale Spule mit der Reaktanz X_L geschaltet. Berechne: a) die Speisespannung U des Stromkreises; b) die Ströme I_R und I_L für Widerstand und Spule; c) die Induktivität L und die Impedanz Z; d) den Leistungsfaktor; e) die aktive und die reaktive Leistung.
Zahlenbeispiel: $R = 6\ \Omega$; $\nu = 50$ Hz; $I_0 = 6$ A; $X_L = 8\ \Omega$.
R: $U = 36$ V; $I_R = 6$ A; $I_L = 4{,}5$ A; $L = 25{,}5$ mH; $Z = 4{,}8\ \Omega$; $\cos\varphi = 0{,}8$; $P = 216$ W; $P_r = 162$ VAR.

10. Ein RLC-Parallelstromkreis, bestehend aus einem Widerstand R, einer Spule mit der Induktivität L und einem Kondensator mit der Kapazität C, erhält eine Spannung U mit der Frequenz ν. Bestimme: a) die Ströme I, I_R, I_L und I_C; b) das Phasenzeigerdiagramm; c) die Impedanz Z des Stromkreises; d) den Phasenunterschied φ zwischen Stromstarke und Spannung, e) die Frequenz ν_0, für welche die Stromstärke minimal ist und diesen Minimalwert I_0.
Zahlenbeispiel: $R = 10\ \Omega$; $L = (10\pi)^{-1}$ H; $C = 10^{-3}/(2\pi)$ F; $U = 220$ V; $\nu = 50$ Hz.
R: $I_R = I_L = 22$ A; $I_C = 11$ A; $I = 24{,}6$ A; $Z = 8{,}94\ \Omega$; $\mathrm{tg}\,\varphi = -0{,}5$; $\nu_0 = 70{,}7$ Hz; $I_0 = 22$ A.

3

Tests mit Antworten zur Auswahl

1. Die Formel der maximalen elektromotorischen Wechselspannung ist:

a) $\omega \cdot E \cdot \sqrt{2}$; b) $\dfrac{B \cdot S}{\omega}$; c) $\dfrac{\omega}{\theta m}$;

d) $\omega \cdot B \cdot S$; e) $\dfrac{\omega}{B \cdot S} \cdot \cos\alpha$.

2. Eine ideale Spule bewirkt in einem Wechselstromkreis: a) eine Schwingbewegung aller freien Elektronen; b) das Auftreten der Selbstinduktion; c) die Phasenverschiebung der Stromstärke vor die Spannung; d) das Auftreten einer kapazitiven Impedanz; e) das Ansteigen des chemischen Widerstands.

3. Welche der folgenden Formeln entspricht dem Momentanwert der Spannung an den Klemmen einer idealen Spule, die sich in einem RLC-Reihenstromkreis befindet?

a) $-L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$; b) $2^{1/2}\omega LI \sin\left(\omega t - \varphi + \dfrac{\pi}{2}\right)$;

c) $\omega LI \sin\left(\omega t - \varphi + \dfrac{\pi}{2}\right)$; d) $i \cdot \omega L \sin(\omega t - \varphi)$;

e) $\omega LI_m \sin\left(\omega t - \varphi + \dfrac{\pi}{2}\right)$.

4. Die Formel für den Momentanwert der Stromstärke eines Sinusstroms mit der Amplitude von 15 A, der Periode von 0,02 s, in Bezug auf den Ursprung um $t = 0{,}00125$ s nach hinten verschoben, ist:

a) $i = 15\sin\left(100\pi t - \dfrac{\pi}{8}\right)$; b) $i = 15\sqrt{2}\sin\left(100\pi t + \dfrac{\pi}{2}\right)$;

c) $i = 15\sqrt{2}\sin\left(50\pi t - \dfrac{\pi}{3}\right)$; d) $i = 15\sin\left(50\pi t + \dfrac{\pi}{3}\right)$;

e) $i = 15\sin\left(100\pi t - \dfrac{\pi}{6}\right)$.

5. Die Impedanz des *RLC*-Reihenstromkreises für Wechselstrom ist:

a) $Z = R + (X_L - X_C)^2$; b) $Z^2 = R^2 - (X_L - X_C)^2$;

c) $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$; d) $Z = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{(X_L - X_C)^2}}$;

e) $\frac{1}{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

6. Ein Wechselstromkreis, gespeist von einer Spannung von 220 V mit der Frequenz von 50 Hz, besteht aus einem Widerstand $R = 30\,\Omega$, in Reihe mit einer Spule vom Widerstand Null und einem Kondensator. Bei der gegebenen Frequenz hat die Spule eine induktive Reaktanz $X_L = 160\,\Omega$ und der Kondensator eine kapazitive Reaktanz $X_C = 120\,\Omega$. Wieviel betragt die Stromstärke?

a) 4,4 A; b) 5,2 A; c) 3,8 A;
d) 5,8 A; e) 1,6 A.

7. Der Gütefaktor eines *RLC*-Reihenstromkreises hat die Formel:

a) $Q = \frac{U_C}{U}$; b) $Q = \frac{1}{\sqrt{RC}}$; c) $Q = \frac{1}{\sqrt{LC}}$;

d) $Q = \frac{1}{L\sqrt{RC}}$; e) $Q = \left(\frac{U_C}{U}\right)_{\omega=\omega_0}$

8. Ein Reihenstromkreis mit der Frequenz $\nu = 50$ Hz enthalt eine Spule mit der Induktivität $L = 0{,}1$ H und einen Widerstand *R*. Der Phasenunterschied zwischen Spannung und Stromstärke beträgt $\varphi = 30°$. Berechne den Widerstand R:

a) $R = 27{,}2\,\Omega$; b) $R = 17{,}3\,\Omega$; c) $R = 0{,}055\,\Omega$;
d) $R = 108{,}5\,\Omega$; e) $R = 54{,}3\,\Omega$;

9. Ein Reihenstromkreis bestehend aus einem Widerstand *R* und einem Kondensator *C* hat den Leistungsfaktor 0,8. Berechne den Leistungsfaktor des Stromkreises, wenn die gleichen Elemente *RC* parallel geschaltet werden, wobei Frequenz und Speisespannung unverändert bleiben.

a) 0,5; b) 0,3; c) 0,6;
d) 0,9; e) 1.

10. Die Impedanz eines *RLC*-Reihenstromkreises hat bei Resonanz den Wert:

a) 0; b) ∞; c) *R*;
d) 1/*R*; e) R^2.

11. Wenn man in die ideale Spule eines RL-Stromkreises einen Eisenkern einführt, dann: **a)** fällt die Impedanz; **b)** steigt die Stromstärke; **c)** fällt die Spannung auf der Spule; **d)** steigt der Phasenunterschied; **e)** steigt der Leistungsfaktor.

12. Durch eine Spule, die von einer Sinusspannung mit der Pulsation ω gespeist wird, fließt ein Strom *I*. Wenn in Reihe mit der Spule ein Kondensator mit der Kapazität *C* geschaltet wird, bleibt die Stromstärke im Stromkreis unverändert. Bestimme die Induktivität der Spule.

a) $\frac{1}{4\omega^2 C}$; b) $\frac{1}{2\omega^2 C}$; c) $\frac{1}{\omega^2 C}$;

d) $\frac{2}{\omega^2 C}$; e) $\frac{4}{\omega^2 C}$.

13. Bei einem *RLC*-Reihenstromkreis ist der Phasenunterschied zwischen Stromstärke und Spannung an den Klemmen des Stromkreises:

a) abhängig von *R*, *C* und *L*; b) Null; c) $\pi/2$; d) π; e) $\pi/6$;

14. Ein RLC-Reihenstromkreis enthält die Elemente $R = 4\,\Omega$, $X_L = 4\,\Omega$, $X_C = 1\,\Omega$. Er wird mit einer Sinusspannung vom Effektivwert $U = 120$ V gespeist. Die Stromstarke beträgt:

a) 240 A; b) 245 A; c) 42 A;
d) 4,2 A; e) 24 A.

15. Welche von den folgenden Formeln entspricht dem Momentanwert der Spannung auf einer realen Spule, die mit Wechselstrom gespeist wird?

a) $u = 2^{1/2} \cdot I \cdot \left[R \cdot \sin(\omega t - \varphi) + \omega L \cdot \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right]$;

b) $u = I \cdot 2^{-1/2}\left[R \sin(\omega t - \varphi) + \omega L \cdot \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right]$;

c) $u = I \cdot [\omega L \sin(\omega t + \varphi) + R \cdot \sin(\omega t)]$;

d) $u = I \cdot (\omega L + R)$;

e) $u = I_{\max}\left[\omega L \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + R \cdot \sin(\omega t)\right]$.

16. Die Impedanz eines *RLC*-Parallelstromkreises hat die Formel:

a) $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$; b) $Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$;

c) $Z = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} + \frac{1}{X_C}\right)^2}$; d) $Z = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} + \frac{1}{X_L}\right)^2}$;

e) $Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}}$.

17. In einem *RLC*-Parallelstromkreis: **a)** ist in der *LC*-Schleife die Stromstärke bei Resonanz minimal; **b)** hat die Impedanz den Wert $Z = 1/\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$; **c)** ist die Scheinleistung bei Resonanz maximal; **d)** ist die reaktive Leistung bei Resonanz maximal; **e)** keine der obigen Antworten.

3

18. Eine Schaltung mit Wechselstrom funktioniert mit der Spannung $U = 220$ V und nimmt einen Strom $I = 11$ A auf, wobei der Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0{,}8$ induktiv ist. Berechne den Widerstand der Schaltung:

a) 20 Ω; b) 40 Ω; c) 10 Ω; d) 50 Ω; e) 16 Ω.

19. Für einen RLC-Parallelstromkreis beträgt das Verhältnis aus aktiver und reaktiver Leistung $P/P_r = 3/4$ und $X_C = 2X_L$. Das Verhältnis R/X_L beträgt:

a) 8/3; b) 4/3; c) 3/4; d) 3/8; e) 3/2.

20. Eine Spule mit dem Widerstand von 6 Ω und der Induktivitat von 8/314 H wird mit einer Wechselspannung von 10 V und 50 Hz gespeist. Welcher Strom fließt durch die Spule?

a) $I = 0{,}6$ A; b) $I = 0{,}8$ A; c) $I = 1{,}2$ A; d) $I = 1$ A; e) $I = 0{,}7$ A.

21. Die aktive Leistung hat die Formel:

a) $IU\sin\alpha$; b) IU ; c) $IU\,\mathrm{tg}\alpha$; d) RI^2 ; e) $P_a\sin\alpha$.

22. Die aktive Leistung wird gemessen in:

a) Ws; b) W; c) MJ/s; d) VA; e) VAR.

23. Ein Parallelstromkreis, gebildet aus einem Widerstand $R = 30$ Ω, einem Kondensator mit der Kapazitat $C = 300$ µF und einer Spule mit der Induktivität $L = 0{,}08$ H, wird mit der Frequenz von 50 Hz betrieben. Wieviel beträgt der Leistungsfaktor des Stromkreises?

a) 0,923; b) 0,823; c) 0,723; d) 0,623; e) 0,523.

24. Der Widerstand $R = 40$ Ω, angeschlossen an eine Spannung $u(t) = 120\sin\omega t$ (V), befindet sich in einem Gefäß mit dem Volumen $V = 144$ dm³, welches ein ideales Gas mit dem Adiabatenexponenten $\gamma = 1{,}4$ enthält. Der Druck des Gases aus dem Gefäß steigt mit $\Delta p = 3 \cdot 10^5$ N/m² nach einer Zeit von:

a) 20 min; b) 5 min; c) 15 min; d) 12 min; e) 10 min.

Kapitel 3 – Zusammenfassung

Das Funktionprinzip der elektrischen Generatoren beruht auf der Rotation einer Schleife um eine Achse, die senkrecht steht auf die Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes.

Der Einphasensynchrongenerator besteht aus einem Rotor, der das Magnetfeld erzeugt (Induktor) und einem Stator, in dessen Windungen die Wechselspannung induziert wird.

Der Effektivwert der Stromstärke eines Wechselstroms ist gleich mit der Stromstärke eines Gleichstroms, welcher auf demselben Widerstand und in derselben Zeit dieselbe Wärme wie der Wechselstrom erzeugen würde.

Der Widerstand erzeugt im Wechselstrom keinen Phasenunterschied zwischen Stromstärke und Spannung. Der Kondensator erzeugt einen scheinbaren Widerstand $X_C = \dfrac{1}{\omega \cdot C}$ und einen Phasenvorsprung der Stromstärke gegenüber der Spannung. Die Spule erzeugt einen scheinbaren Widerstand $X_L = \omega \cdot L$ und einen Phasenvorsprung der Spannung in Bezug auf die Stromstärke.

Die Impedanz eines RLC-Reihenstromkreises ist: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

Die RLC-Stromkreise sind im **Resonanzbetrieb**, wenn $X_L = X_C$, der kapazitive Effekt wird vom induktiven kompensiert, die Phasenverschiebung ist Null. Die Resonanzfrequenz hat die Formel von Thomsom $\nu_0 = \dfrac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$.

Man nennt **Gütefaktor** eines Stromkreises $Q = \dfrac{1}{R} \cdot \sqrt{\dfrac{L}{C}}$.

Die Größe $Z_0 = \sqrt{L/C}$ heißt **charakteristische Impedanz** des Stromkreises.

Die Impedanz des RLC-Parallelstromkreises ist:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\dfrac{1}{R^2} + \left(\dfrac{1}{X_C} - \dfrac{1}{X_L}\right)^2}}$$

Die aktive Leistung P ist die auf dem Widerstand R abgegebene Leistung:

$$P = P_a \cdot \cos\varphi = U \cdot I \cdot \cos\varphi .$$

Die reaktive Leistung P_r entspricht der Energie, die im Magnetfeld der Spule und im elektrischen Feld zwischen den Platten des Kondensators enthalten ist.

$$P_r = P_a \cdot \sin\varphi = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

Die Scheinleistung P_a entspricht der Energie, die pro Sekunde vom Generator an den Stromkreis abgegeben wird.

$$P_a = U \cdot I$$

Der Transformator ist ein Gerät, das zum Umwandeln der Spannung und der Stromstärke des Wechselstroms verwendet wird und nützlich ist beim Transport der elektrischen Energie auf große Entfernungen.

Das Übersetzungsverhältnis des Transformators k wird definiert als Verhältnis der Windungszahlen der Primär- und der Sekundärspule.

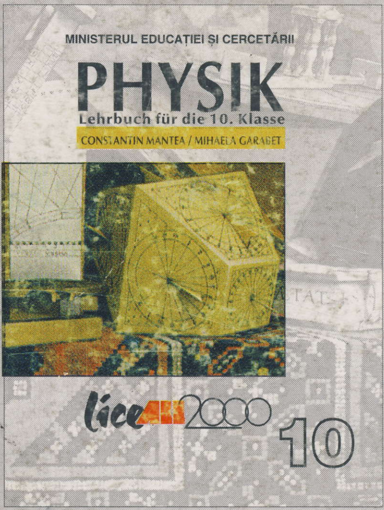
Die Elektromotoren sind Maschinen, welche elektrische Energie in mechanische Energie umwandeln. Der Asynchronmotor ist ein Wechselstrommotor, bei dem das Magnetfeld, erzeugt von der Statorwicklung, den Rotor auf Grund der Wechselwirkung mit dem in diesen induzierten Strom antreibt.

INHALTSVERZEICHNIS

KAPITEL 1
Elemente der Thermodynamik

KAPITEL 2
Die Erzeugung und die Anwendung des Gleichstroms

KAPITEL 3
Die Erzeugung und die Anwendung des Wechselstroms



PHYSIK – Lehrbuch für die 10. Klasse

CONSTANTIN MANTEA
MIHAELA GARABET

www.all.ro

ISBN 973-571-603-8

9789735716035