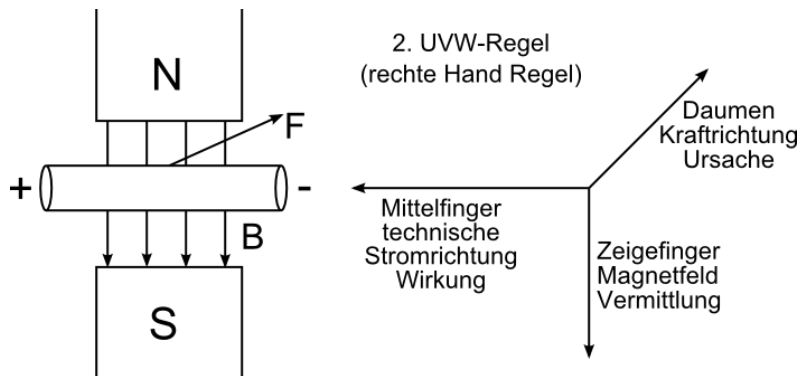


Induktion

Bewegte Leiter



- durch die Kraft werden Ladungsträger bewegt
- auf bewegte Ladungsträger wirkt im Magnetfeld eine Kraft = Lorentzkraft
- Verschiebung der Ladungsträger ruft elektrisches Feld hervor

$$F_L = F_{el}$$

$$Q \cdot v \cdot B = E \cdot Q$$

homogenes elektrisches Feld $E = \frac{U_{ind}}{l}$

$$\Rightarrow \mathbf{U} = (-) \mathbf{B} \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{l}$$

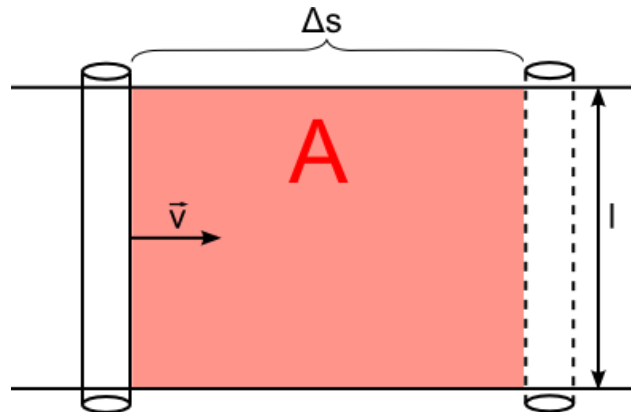
mehrere Leiter:

$$U_{ind} = -N \cdot B \cdot v \cdot l \text{ mit } v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

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

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

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



Magnetischer Fluss

Bei jeder Änderung des magnetischen Flusses Φ durch eine Leiterschleife oder Spule tritt eine Induktionsspannung U_{ind} auf.

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

Formelzeichen: Φ

Einheit: Wb (Weber) $1 \text{ Wb} = 1 \text{ m}^2 \cdot 1 \text{ T} = 1 \text{ Vs}$

Gleichung: $\Phi = B \cdot A$

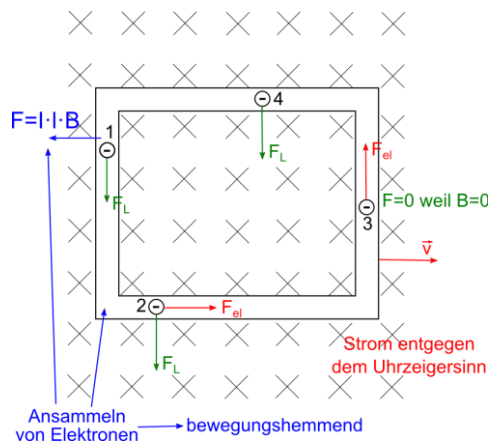
$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \text{ mit } \Phi(t) = B(t) \cdot A(t)$$

$$\text{folgt: } U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{d}{dt} (B(t) \cdot A(t))$$

1. Ableitung:

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \left(A \cdot \frac{dB(t)}{dt} + B \cdot \frac{dA(t)}{dt} \right)$$

$A \cdot \frac{dB(t)}{dt}$	$B \cdot \frac{dA(t)}{dt}$
Erzeugung einer U_{ind} bei konstanter Fläche durch Änderung der Flussdichte (z.B. durch Änderung der Stromstärke) ⇒ Transformator	Erzeugung einer U_{ind} bei konstanter magnetischer Flussdichte bei Änderung der Fläche ⇒ Generator



Generator

Herleitung:

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot \frac{d(B \cdot A)}{dt} = -N \cdot \left(A \cdot \frac{dB(t)}{dt} + B \cdot \frac{dA(t)}{dt} \right)$$

Induktionsspannung durch Änderung der Fläche $\frac{dA}{dt} \neq 0$

bei konstantem Magnetfeld $\frac{dB}{dt} = 0$

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot B \cdot \frac{dA(t)}{dt}$$

Flächenänderung $A(t) = A_0 \cdot \cos \varphi$

mit $\varphi = \omega \cdot t$ ω ... Kreisfrequenz $2 \cdot \pi \cdot f$

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot B \cdot \frac{d}{dt} \cdot A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot B \cdot A_0 \cdot \frac{d}{dt} \cdot (\cos(\omega \cdot t))$$

$$U_{\text{ind}} = N \cdot B \cdot A_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$U_{\text{ind}} = N \cdot B \cdot A_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\text{Maximalspannung } U_{\text{max}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot B \cdot A_0$$

f... Frequenz des Wechselstroms (Drehbewegung)

N... Windungszahl der Induktionsspulen

B... magnetische Flussdichte des Erregerfeldes

A₀... Fläche der Induktionsspulen

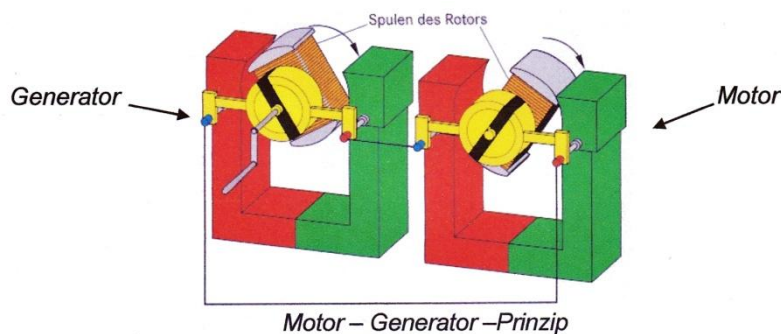
$$u(t) = U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

Leistung im Wechselstromkreis:

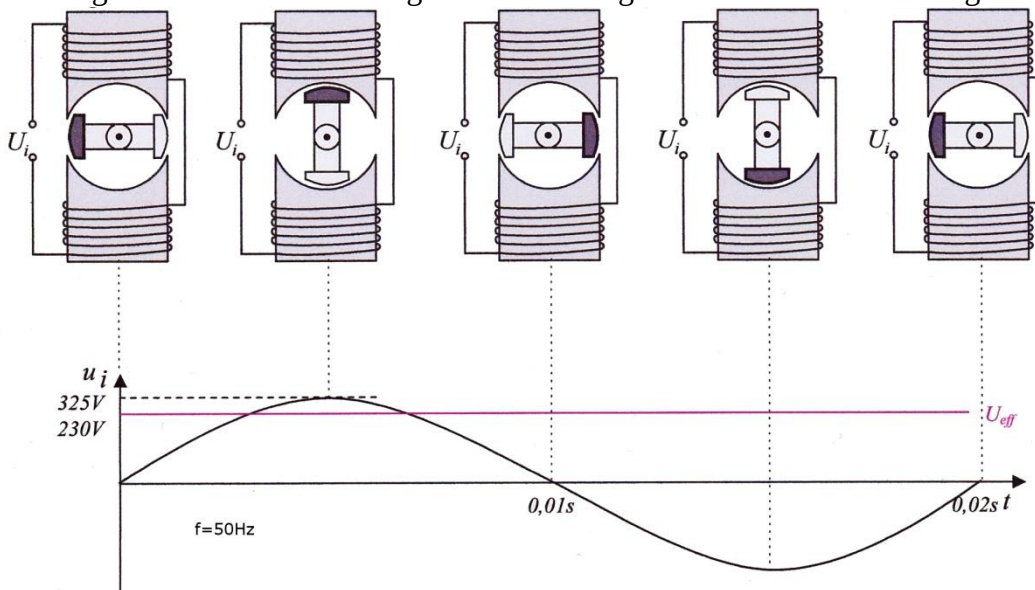
$$P(t) = u(t) \cdot i(t) = U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} \cdot \sin^2(\omega \cdot t)$$

Aufbau:

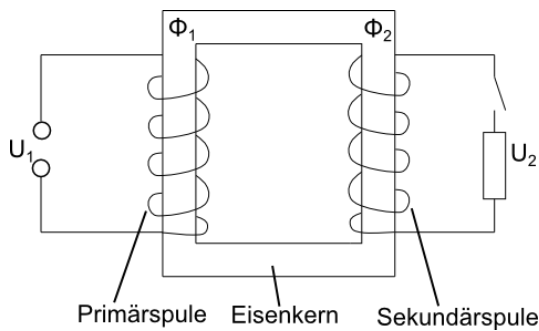


- Rotor
- Stator
- Schleifringe oder Kommutator
- Kohlebürsten

Wirkungsweise über Anwendung des Induktionsgesetzes durch Veränderung der Fläche:



Transformator



- Primärspule $\Rightarrow$ Wechselspannung $\Rightarrow \Phi$ ändert sich ständig
- Φ durchsetzt auch Sekundärspule $\Rightarrow$ Induktionsspannung
- idealer Transformator: $R=0 \Rightarrow$ nicht belastet (Stromkreis auf Sekundärseite nicht geschlossen)

$$\Rightarrow \frac{U_1(t)}{U_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{oder} \quad \frac{U_{1 \text{ eff}}}{U_{2 \text{ eff}}} = \frac{N_1}{N_2}$$

- bei idealem Transformator im Kurzschlussfall gilt:

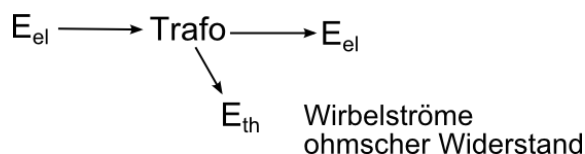
$$\frac{I_{1 \text{ eff}}}{I_{2 \text{ eff}}} = \frac{N_2}{N_1}$$

- in der Primärspule wird durch Selbstinduktion eine Spannung induziert, die der angelegten Spannung entgegenwirkt
- der sich periodisch ändernde Fluss Φ im Eisenkern führt zu einer Induktionsspannung U_2

Gesetzmäßigkeiten:

Spannungsübersetzung am idealen unbelasteten Transformator ($R \rightarrow \infty$)	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$
Stromstärkeübersetzung am idealen stark belasteten Transformator ($R=0$)	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$
Leistung am Transformator bei starker Belastung unter Vernachlässigung aller Verluste ($\Phi_1 = \Phi_2$)	$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$

Energieumwandlung:



Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{\text{abgegeben}}}{P_{\text{zugeführt}}} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1}$$

Lenzsches Gesetz

Energieerhaltungssatz bei elektromagnetischer Induktion

vor nach

$$0 = E_{\text{mech}} + E_{\text{el}}$$

$$0 = F \cdot \Delta s + Q \cdot U_{\text{ind}}$$

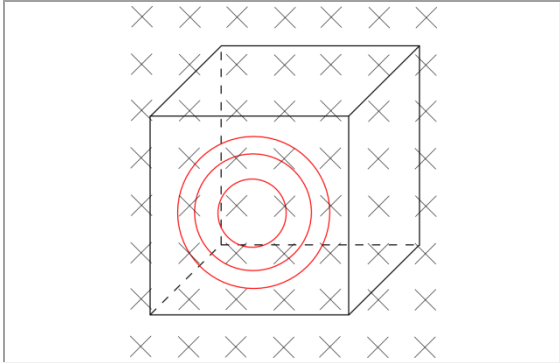
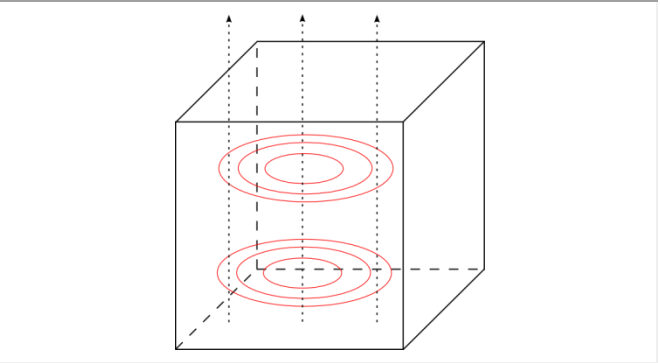
$$\Rightarrow U_{\text{ind}} = - \frac{F \cdot \Delta s}{Q} \quad \text{Kraft entspricht Lorentzkraft } F = B \cdot I \cdot l$$

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

Lenzsche Regel:

Der Induktionsstrom (und damit Spannung; wirkende Kräfte) sind stets so gerichtet, dass sie der Ursache der Entstehung entgegenwirken.

Wirbelströme

zeitlich konstantes Magnetfeld	zeitlich veränderliches Magnetfeld
	
Wirbelströme sind abhängig von der Bewegungsrichtung und der Richtung des Magnetfeldes	Wirbelströme sind abhängig von der Änderungsrichtung der magnetischen Flussdichte und der Richtung des Magnetfeldes

Wirbelströme entstehen in massiven metallischen Leitern, wenn sich das umfasste magnetische Feld ändert. Wirbelströme können durch Blätterung vermieden werden.

Wirbelströme sind:

- | | |
|--|---|
| erwünscht | unerwünscht |
| <ul style="list-style-type: none"> • Wirbelstrombremse • Oberflächenhärten • Tachometer • kWh-Zähler • Induktionsherd | <ul style="list-style-type: none"> • Motor • Generator • Transformator |

Selbstinduktion

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{mit} \quad L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A$$

- Induktionsspannung als Folge der Verringerung des magnetischen Flusses (beim Ausschalten)
- ansteigender Strom $\Rightarrow$ magnetischer Fluss nimmt zu (Einschalten)
- $\Rightarrow$ Induktionsspannung wirkt diesem Vorgang entgegen
- Stromstärke erreicht erst allmählich Höchstwert
- lange dünne Spule: $B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$

Induktivität L

Die Induktivität einer Spule gibt an, wie stark die Änderung der Stromstärke in der Spule aufgrund der Selbstinduktion behindert wird.

Formelzeichen: L

Einheit: H (Henry)

Die Induktivität einer langen Spule kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A$$

$$U_{\text{ind}} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Interpretation:

physikalische Größen:

A... Querschnittsfläche der Spule

l... Länge der Spule

N... Windungszahl der Spule

μ_r ... Permeabilitätszahl

μ_0 ... magnetische Feldkonstante

Zusammenhänge:

$L \sim A$: je größer A desto größer L

$L \sim N^2$: bei doppelter N vervierfacht sich L

-indirekte Proportionalität zur l

-Induktivität ist vom Stoff in der Spule abhängig

-Gültigkeitsbedingungen: lange, dünne Spule

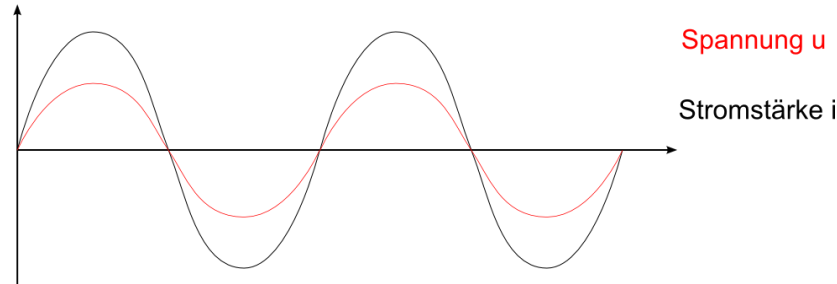
Wechselstromkreis

Ohmsches Bauelement:

Durch Wechselwirkung zwischen Elektronen und Metallgitter entsteht der ohmsche Widerstand.

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R_{\sim} = R_{-}$$



Spannung und Stromstärke verlaufen zeitgleich

$$E_{el} \rightarrow E_{th}$$

Der Spannungsquelle wird Energie entnommen.

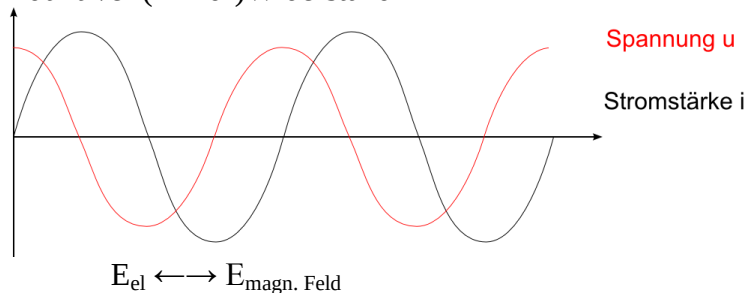
Anmerkung: $R_{-} = Z_{...}$ Scheinwiderstand im Wechselstromkreis

Spulen:

Durch Selbstinduktion in der Spule entsteht ein induktiver Widerstand.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

X_L ... induktiver (Blind-)Widerstand



Spannungsquelle Spule

Die Stromstärke eilt der Spannung hinterher

Der Spannungsquelle wird keine Energie entnommen.

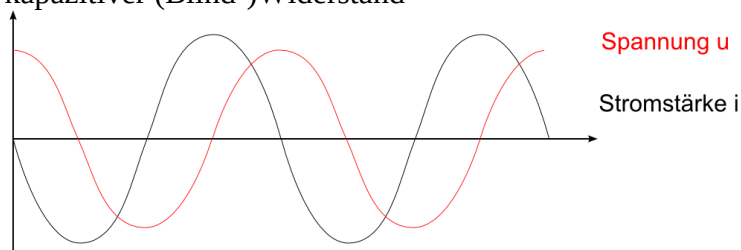
Kondensatoren:

Im Gleichstromkreis ist der Stromfluss unterbrochen.

Durch die begrenzte Aufnahmefähigkeit des Kondensators für elektrische Ladungen entsteht der kapazitive Widerstand.

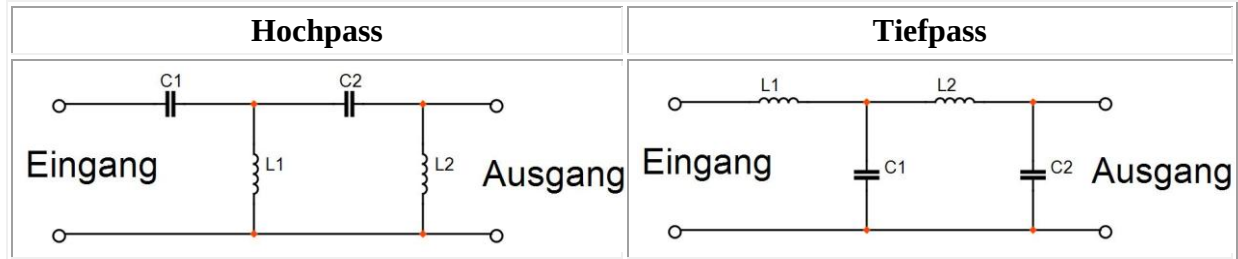
$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

X_C ... kapazitiver (Blind-)Widerstand

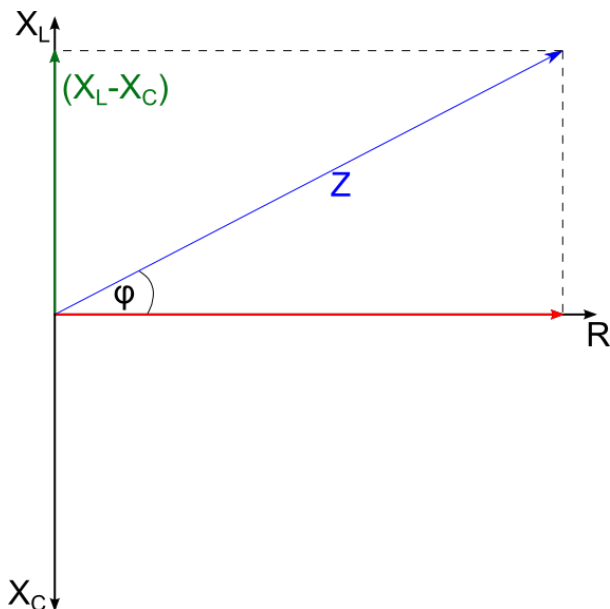


$E_{el} \longleftrightarrow E_{el, \text{Feld}}$
 Spannungsquelle Kondensator
 Die Stromstärke eilt der Spannung voraus.
 Der Spannungsquelle wird keine Energie entnommen.

Hoch- und Tiefpass:



Leistung im Wechselstromkreis:



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

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

φ ... Phasenverschiebung zwischen U und I
 $\cos \varphi$... Leistungsfaktor; $\cos \varphi \leq 1$

Es ist zwischen der Wirkleistung, der Blindleistung und der Scheinleistung zu unterscheiden.

Die **Wirkleistung** ist die im Wechselstromkreis an ohmschen Widerständen (Wirkwiderständen) "nach außen" umgesetzte Leistung.

Die **Blindleistung** ist die in den Blindwiderständen X_L und X_C kurzzeitig zum Aufbau des magnetischen bzw. elektrischen Feldes erforderliche Leistung, die beim Abbau der Felder wieder an den Stromkreis abgegeben wird. Ihr zeitlicher Mittelwert ist daher null.

Wirkleistung P

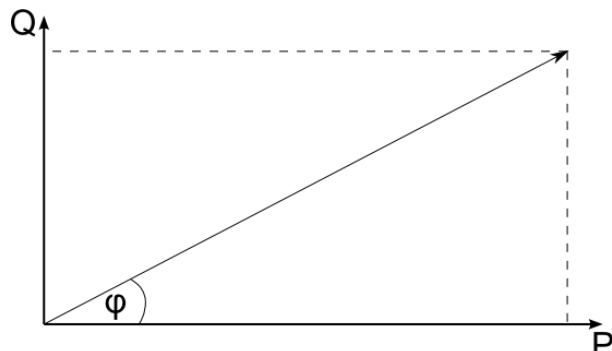
$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Blindleistung Q

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Die **Scheinleistung** S erhält man damit zu:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$



Leitungsvorgänge in Metallen und Halbleitern

Teilchenaufbau	Bändermodell
Elektronen im Metallgitter frei beweglich (ortsfixe positive Ladungen) in Halbleitern: bei Energiezufuhr → zusätzliche e^- werden frei → jedes e^- hinterlässt Elektronenfehlstelle → kann durch e^- des Nachbaratoms besetzt werden Temperaturabhängigkeit in Metallen: $R = \theta \cdot \frac{1}{A} = \theta \cdot \frac{l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)}{A} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$ $\theta = \frac{1}{n \cdot e \cdot \mu}$ Driftgeschwindigkeit: $v_D = \frac{U_H}{b \cdot B}$ in Halbleitern: je höher T, desto größer e^--Anzahl	Valenzband: voll besetzt Leitungsband: teilweise besetzt, Abstand und Besetzung entscheiden über elektrische Leitfähigkeit $E_n = k \cdot 13,6 \text{ eV} \cdot \frac{Z^2}{n^2}$ $r_n = k \cdot a_0 \cdot n^2$ 