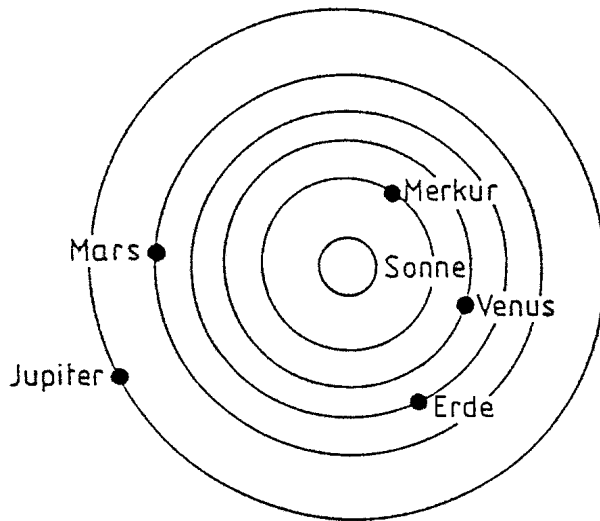
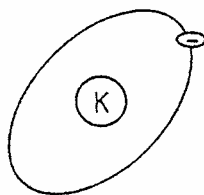


### Der elektrische Leiter

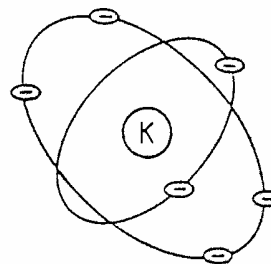


Wie beim Sonnensystem die Planeten um die Sonne, kreisen bei den Atomen der chemischen Elemente die Elektronen auf verschiedenen Bahnen um einen Kern. Der Kern ist positiv geladen; die Elektronen haben eine negative Ladung. Die Anzahl der Bahnen und die Zahl der Elektronen pro Bahn sind ausschlaggebend für die Eigenschaften des Atoms.



Wasserstoffatom:

- 1 Bahn
- 1 Elektron (außen)
- 1 Kern (1 fach positiv)



Kohlenstoffatom

- 2 Bahnen
- 2 Elektronen (innen)
- 4 Elektronen (außen)
- 1 Kern (6 fach positiv)

Bei der elektrischen Leitfähigkeit eines Stoffes spielt die Zahl der Elektronen in der äußeren Bahn und die Anordnung der Atome zueinander eine wichtige Rolle, da Elektronen, die die äußere Bahn verlassen können oder von ihr 'eingefangen' werden, die Leitung des elektrischen Stromes erst ermöglichen.

Die elektrische Leitfähigkeit eines Materials wird durch den Spezifischen Widerstand  $\rho$  (kleines griechisches Rho) beschrieben. Das ist der Widerstand in Ohm, den ein „Draht“ von 1 m Länge und 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt aufweist. Je schlechter ein Material den Strom leitet, desto größer ist sein spezifischer Widerstand. Der Kehrwert von  $\rho$  wird mit  $\kappa$  (kleines griechisches Kappa) bezeichnet und heißt Leitfähigkeit. Ein großer Zahlenwert bedeutet, daß das Material gut leitet. Ein exzellenter Isolator hat den Wert  $\kappa = 0$  (Nichtleiter).

Material	Chem. Zeichen	$\rho$ [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ]	$\kappa$ [ $(1/\Omega) \cdot \text{m}/\text{mm}^2$ ]
Silber	Ag	0,016	62
Kupfer	Cu	0,017	57
Gold	Au	0,022	45
Aluminium	Al	0,029	35
Eisen	Fe	0,100	10
Platin	Pt	0,111	9
Zinn	Sn	0,120	8,3
Blei	Pb	0,208	4,8
Quecksilber	Hg	0,95	1,05

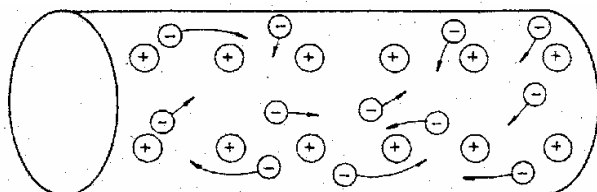
Bitte diese Tabelle (Reihenfolge und Zahlenwerte) einprägen. Prüfungsstoff !!!!

## Berechnung des Widerstandes eines Drahtes

$\rho$  = spezifischer Widerstand in  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  ]  
 $l$  = Länge in m  
 $A$  = Querschnitt in  $\text{mm}^2 = d^2 * \pi / 4$ .  
 $d$  = Drahtdurchmesser in mm (rund)

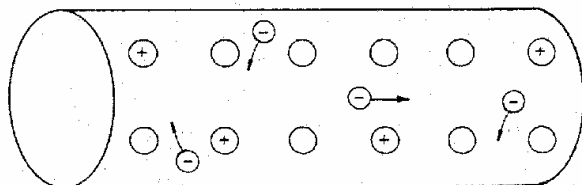
$$R = \rho * \frac{l}{A}$$

Für den Stromfluß ist ein Material erforderlich, daß elektrischen Strom (Elektronen) leitet.



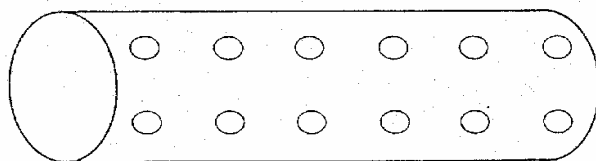
### guter elektrischer Leiter:

viele freie Elektronen in ungeordneter Bewegung (ohne angelegte Spannung)  
z.B. alle Metalle



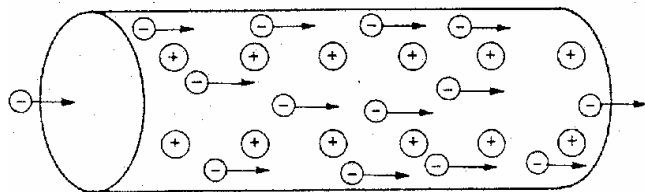
### schlechter elektrischer Leiter:

wenig freie Elektronen in ungeordneter Bewegung (ohne angelegte Spannung)



### elektrischer Nichtleiter (Isolator):

keine freien Elektronen (Elektronen fest in den Schalen verankert) z.B. Keramik, Glas, Teflon, trockenes Holz und viele Kunststoffe



### Elektrischer Leiter mit angelegter Spannung:

→ die freien Elektronen fließen in einer Richtung.

### Flußrichtung der Elektronen:

→ vom negativen Pol (Kathode) zum positiven Pol (Anode)

### Technische Flußrichtung:

→ von positiven Pol zum negativen Pol

## Stromdichte

Die Stromdichte gibt an, wie der Strom über den Leiterquerschnitt verteilt ist. Bei Gleichstrom und niedrigen Frequenzen wird der ganze Querschnitt ausgenutzt, so daß gilt

$$S = \frac{I}{A}$$

Darin bedeuten:

$S$  = Stromdichte in  $\text{A}/\text{mm}^2$

$I$  = Strom in A

$A$  = Fläche in  $\text{mm}^2$

### Spannung

Unterschied zwischen zwei elektrischen Potentialen.

Vergleichbar mit: zwei unterschiedlich hoch stehenden Gefäßen mit Wasser

**Formelzeichen :** **U**

**Einheit :** **V** (Volt)

### Strom

Bewegung von Ladungen (Elektronen) vom einen Potential zum anderen.

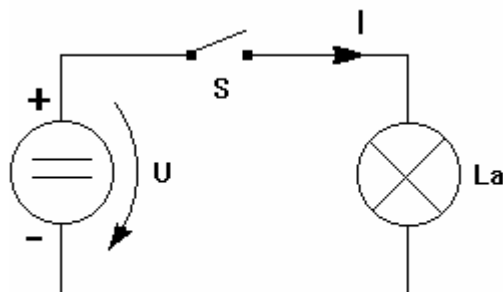
Vergleichbar mit: dem Wasserfluß zwischen den zwei Gefäßen

**Formelzeichen :** **I**

**Einheit :** **A** (Ampere)

Strom kann nur fließen, wenn:

- ein Stromkreis geschlossen ist
- ein Potentialunterschied (=Spannung) vorhanden ist



1 pV	0,000000000001	1 Piko	Billionstel	$10^{-12}$
1 nV	0,000000001	1 Nano	Milliardstel	$10^{-9}$
1 µV	0,000001	1 Mikro	Millionstel	$10^{-6}$
1 mV	0,001	1 Milli	Tausendstel	$10^{-3}$
1 V	1	1	1	$10^0$
1 kV	1000	1 Kilo	Tausend	$10^3$
1 MV	1000000	1 Mega	Million	$10^6$
1 GV	1000000000	1 Giga	Milliarde	$10^9$

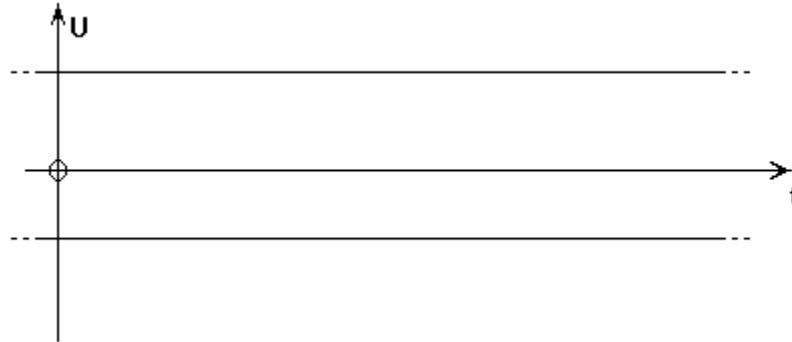
Umrechnungsbeispiele:

3000 V = 3 kV	15000 Ω = 15 kΩ	800 kHz = 0,8 MHz	1250 MHz = 1,25 GHz
0,3 MΩ = 300 kΩ	100 nF = 0,1 µF	4700 pF = 4,7 nF	0,68 mH = 680 µH

**Gleichspannung / Gleichstrom**

engl. "DC" (direct current)

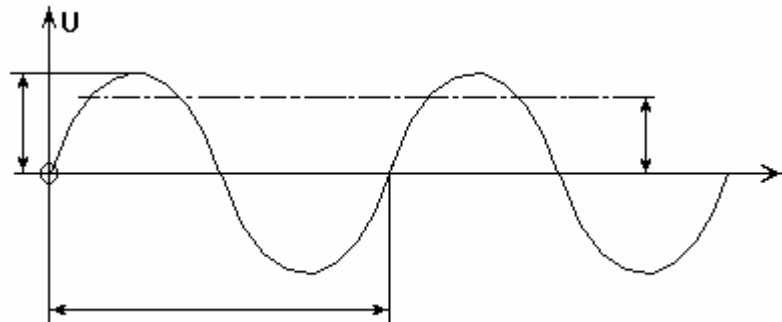
Bei Gleichspannung besteht ein zeitlich konstanter Potentialunterschied, bzw. ist der Elektronenfluß immer gleich groß und hat immer die gleiche Polarität.



**Wechselspannung / Wechselstrom**

engl. "AC" (alternating current)

Bei Wechselspannung/-strom ändert sich der Potentialunterschied/Elektronenfluss ständig in der Größe und der Polarität.



$U_s =$  Spitzenspannung, auch  $U$  oder  $U_{max}$

$U_{eff} =$  Effektivspannung, auch  $U$

$T =$  Periodendauer (Zeit, nachdem sich der Strom-/Spannungsverlauf wiederholt)

$f =$  Frequenz (Anzahl der Schwingungen, Perioden pro Sekunde)

$$U_s = U_{eff} \cdot \sqrt{2}$$

$$U_{eff} = \frac{U_s}{\sqrt{2}}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

Einheit der Periodendauer  $T$  :  
**s** (Sekunde)

1 s

1 ms

1  $\mu$ s

1 ns

Einheit der Frequenz  $f$  :  
**Hz** ("Herz" nach Heinrich Herz)

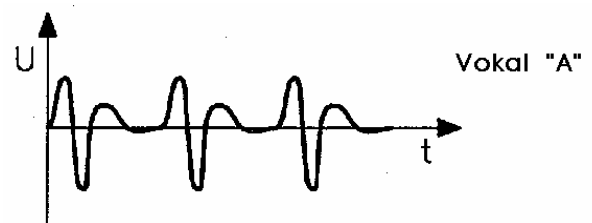
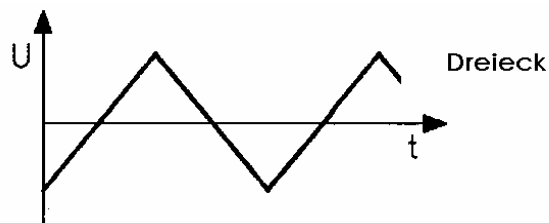
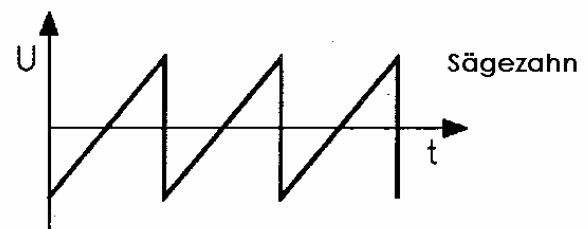
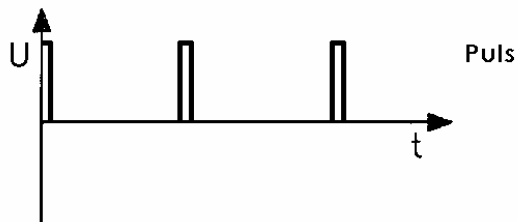
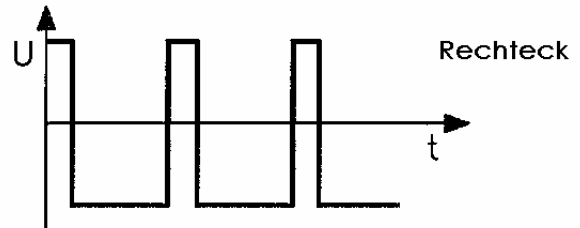
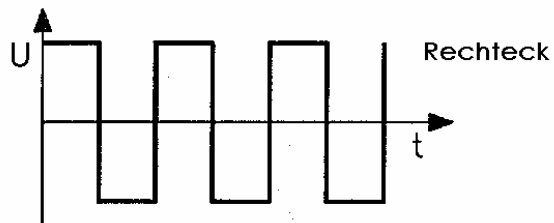
1 Hz

1 kHz

1 MHz

1 GHz

### Nicht-sinus-förmige Wechselspannungen:



Wechselspannungen/-ströme können in beliebigen Kurvenformen existieren.

Gleich welche Kurvenform, jede Wechselspannung hat die Kenngrößen

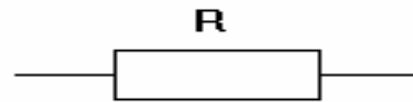
$U_s$	Spitzenspannung
$U_{\text{eff}}$	Effektivspannung
$T$	Periodendauer
$f$	Frequenz

Wenn der Mittelwert über eine Periode nicht gleich Null ist, ist der Wechselspannung eine Gleichspannung dieser Größe überlagert.

## Widerstand

Der Widerstand bezeichnet das Verhältnis zwischen der Spannung und dem Strom eines elektrischen Bauteils.

Vergleichbar mit: einer Engstelle in der Verbindungsleitung von zwei unterschiedlich hoch stehenden Gefäßen mit Wasser.

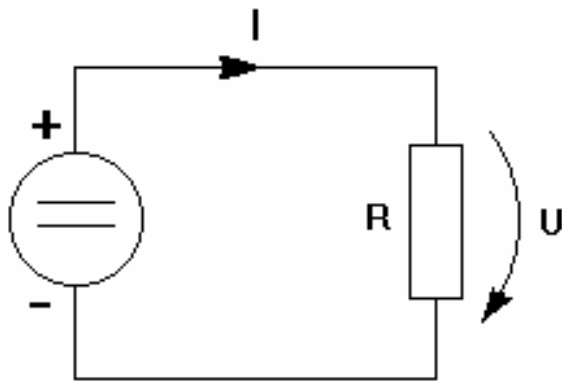


Formelzeichen : R

Einheit :  $\Omega$  (Ohm)

## Ohmsches Gesetz

Das ohmsche Gesetz dient der Berechnung der elektrischen Größen bei einem Widerstand.



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

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

$$U = R \cdot I$$

Ein ohmscher Widerstand ist von der Frequenz unabhängig !

Faustregel:

- An einem **großen Widerstand** muss eine relativ große Spannung liegen, damit ein nennenswerter Strom fließt oder es fließt ein kleiner Strom.
- Bei einem **kleinen Widerstand** reicht schon eine kleine Spannung aus, damit ein großer Strom fließen kann.

## Leistung in einem Widerstand:

Die in einem Widerstand entstehende Leistung wird in thermische Energie (Wärme) umgesetzt.  
Berechnung der Leistung:

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

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P = U \cdot I$$

## Leistung

Die elektrische Leistung ist das Produkt aus elektrischer Spannung und elektrischem Strom.

**Formelzeichen :** P

**Einheit :** W (Watt)

$$P = U \cdot I$$

Beispiel: U = 12 V I = 3 A P = ?

U = 24 V I = 0,25 A P = ?

### Aufgabe:

Stelle die Formel so um, daß U bzw. I aus den anderen beiden Größen berechnet werden kann:

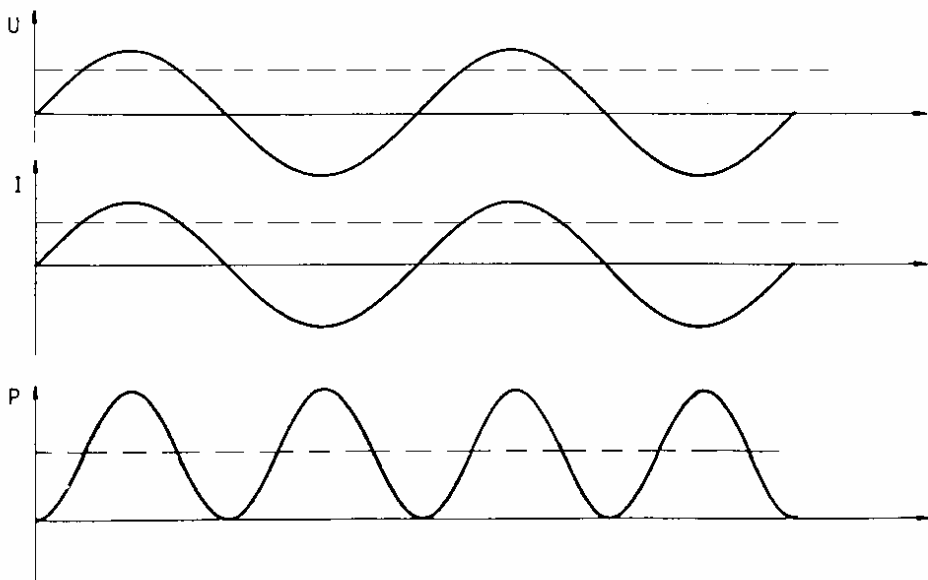
$$U =$$

$$I =$$

Beispiel: P = 100 MW I = 263 A U = ?

P = 60 W U = 230 V I = ?

### Leistungsberechnung bei Wechselspannung/-strom:

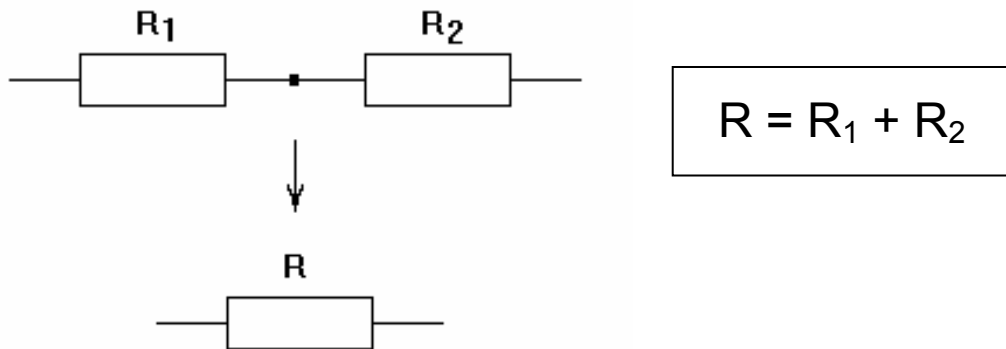


Bei sinusförmiger Wechselspannung pulsiert die Leistung mit der doppelten Frequenz. Die mittlere Leistung ist offenbar  $P = 0,5 \cdot U_s \cdot I_s$  Und da  $I_s = U_s / R$  ist, wird daraus

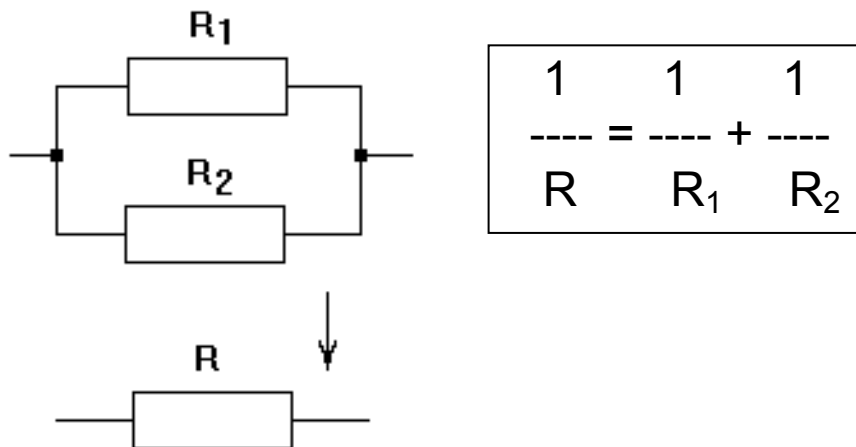
$$P = \frac{U_s^2}{2 \cdot R} \quad \text{oder mit dem Effektivwert } U_{\text{eff}} \quad P = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R} \quad \text{und schließlich } U_{\text{eff}} = \frac{U_s}{\sqrt{2}}$$

## Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen

Reihen(Serien-)schaltung:

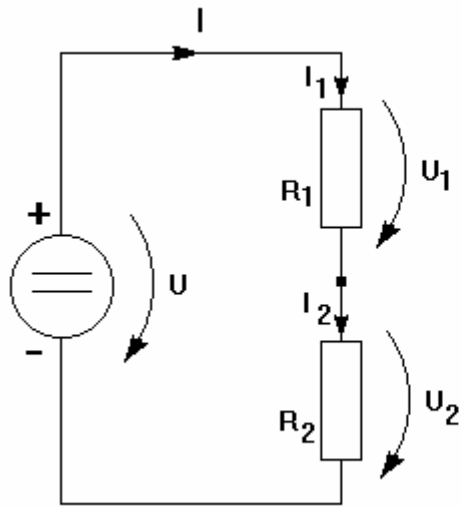


Parallelschaltung:





**Spannungs- und Stromberechnung bei Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen**



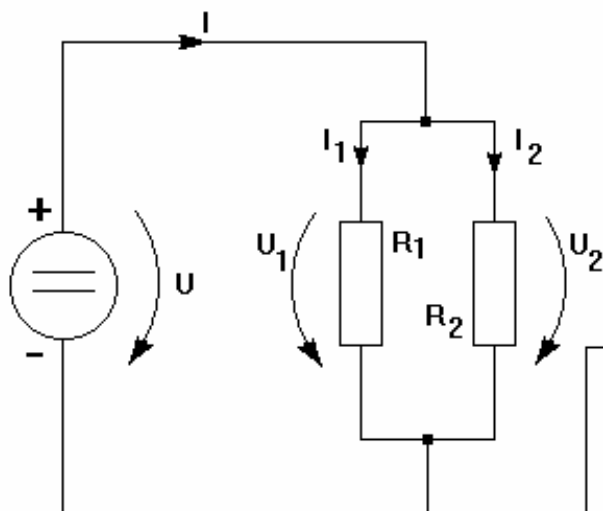
$$I = I_1 = I_2$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



$$U = U_1 = U_2$$

$$I = I_1 + I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

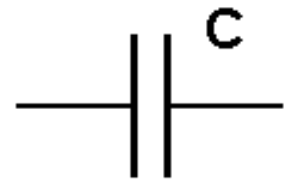
### Kapazität / Kondensator

Der Kondensator besteht prinzipiell aus zwei isolierten Platten mit einem isolierenden Material dazwischen (Dielektrikum).

Legt man eine Gleichspannung an die Pole eines Kondensators an, bildet sich ein elektrisches Feld zwischen den Platten → er lädt sich auf.

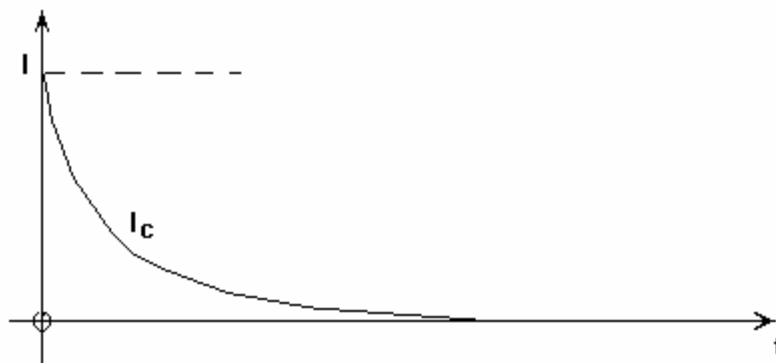
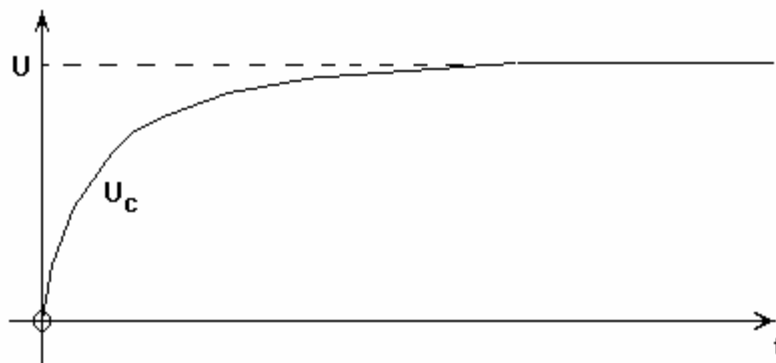
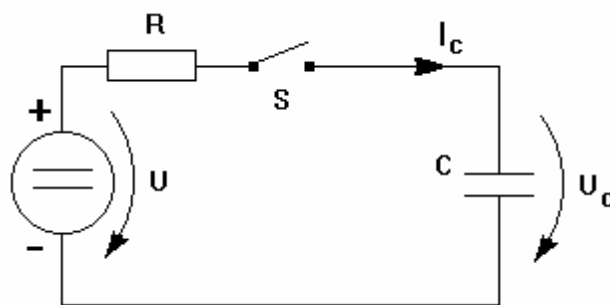
Die Ladung wird solange gehalten, bis sie wieder entnommen, der Kondensator entladen wird.

Der Kondensator wirkt als Ladungsspeicher.



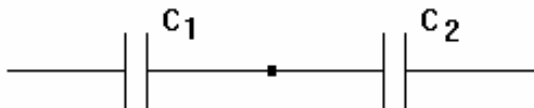
**Formelzeichen :** C

**Einheit :** F (Farad)



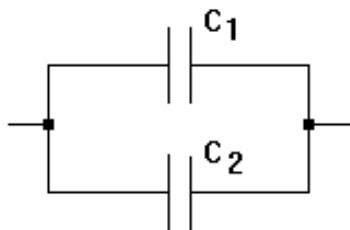
## Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren

Reihen(Serien-)schaltung:



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

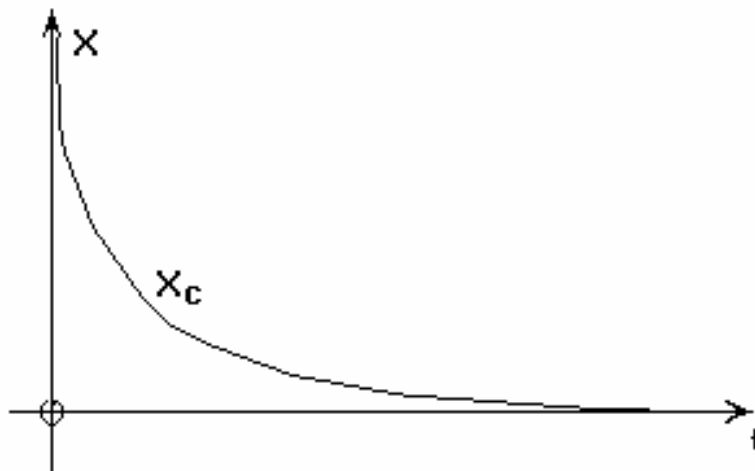
Parallelschaltung:



$$C = C_1 + C_2$$

## Kondensatoren bei Gleichspannung, nieder- und hochfrequenter Wechelspannung

- Ein Kondensator wirkt bei Gleichspannung wie ein Isolator
- Bei Wechelspannung wirkt ein Kondensator wie ein Widerstand  
Dieser Widerstand ist frequenzabhängig !

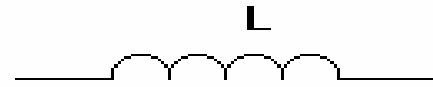


$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

## Induktivität / Spule

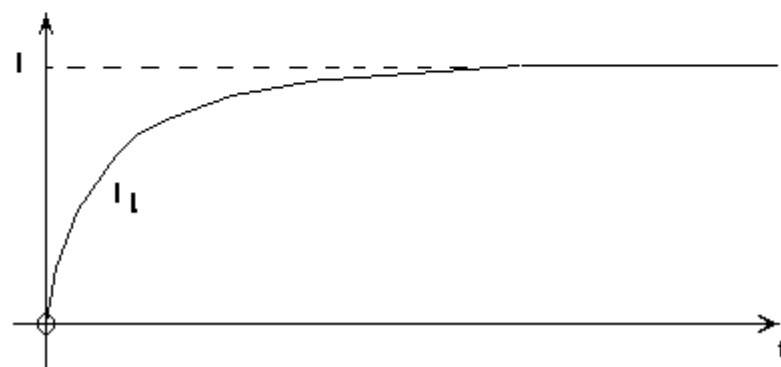
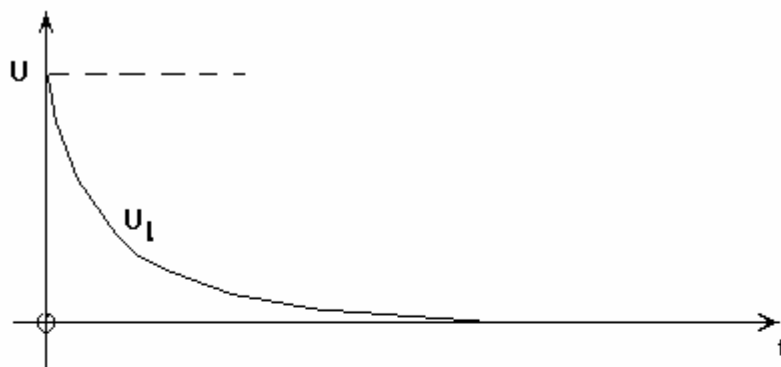
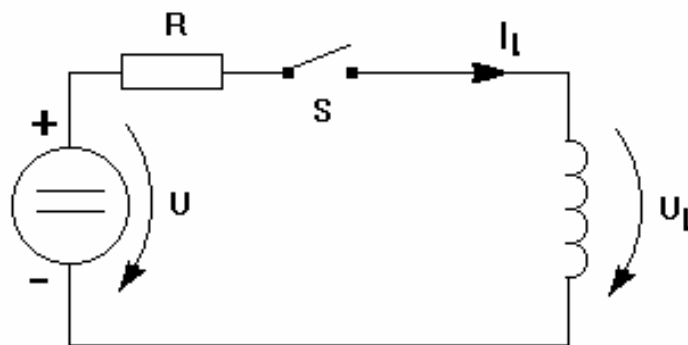
Eine Induktivität besteht prinzipiell aus einer oder mehreren Windungen Draht (elektrisch leitendem Material) mit Luft oder magnetischem Material in der Mitte.

Legt man eine Gleichspannung an die Pole einer Induktivität an, so bildet sich ein magnetisches Feld im Inneren der Spule → sie lädt sich auf. Dieses Feld wird solange erhalten, bis es entnommen, die Spule entladen wird. Die Spule wirkt auch als Ladungsspeicher.



Formelzeichen : L

Einheit : H (Henry)



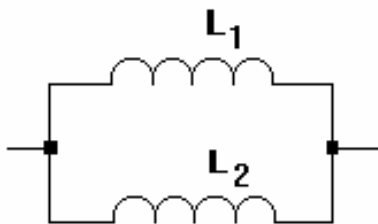
## Parallel- und Reihenschaltung von Induktivitäten

**Reihen(Serien-)schaltung:**



$$L = L_1 + L_2$$

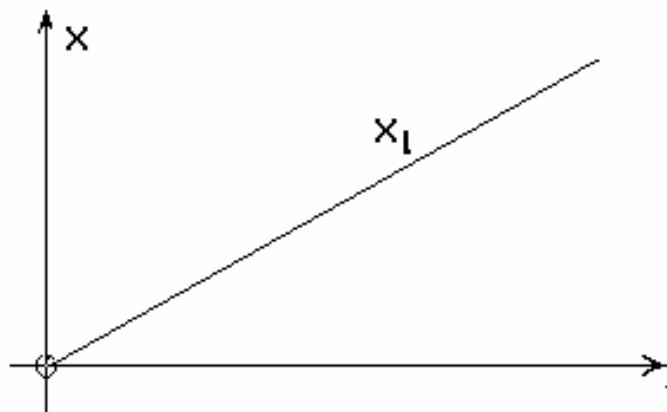
**Parallelschaltung:**



$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

## Induktivitäten bei Gleichspannung, nieder- und hochfrequenter Wechselspannung

- Eine Induktivität wirkt bei Gleichspannung wie ein Kurzschluß
- Bei Wechselspannung wirkt eine Induktivität wie ein Widerstand  
Dieser Widerstand ist frequenzabhängig !

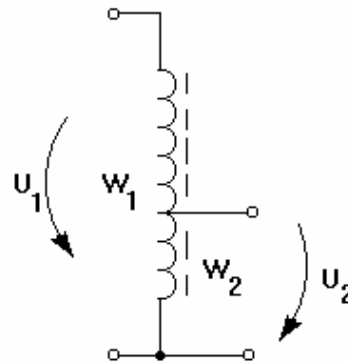
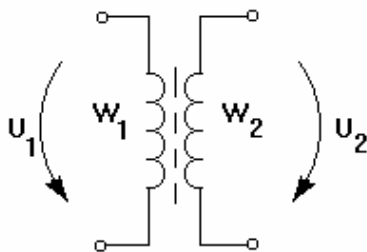
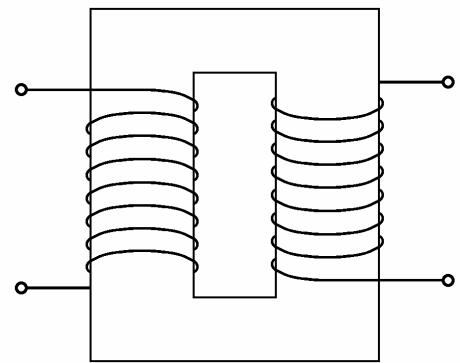


$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

## Der Transformator

Ein Transformator besteht aus zwei Spulen, die auf einen Kern gewickelt sind, so daß beide Spulen vom selben magnetischen Feld durchflossen werden. Die Primärwicklung wandelt einen Wechselstrom bzw. Wechselspannung in ein magnetisches Wechselfeld um, der Kern bündelt und transportiert dieses Feld und die Sekundärwicklung wandelt dieses wieder zurück in einen Wechselstrom bzw. Wechselspannung.

Das Verhältnis von Primär- zu Sekundär-Windungszahl bestimmt auch das Verhältnis von Primär- zu Sekundärspannung.



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

Normalerweise sind Primär- und Sekundärwicklung voneinander isoliert (links). Beim **Spartrafo** ist eine Wicklung auch gleichzeitig Teil der anderen Wicklung (rechts).

Da ein Transformator im Idealfall keine Energie verbraucht, ist die auf der Sekundärseite abgegebene Leistung  $P_2 = U_2 \cdot I_2$  gleich der auf der Primärseite zugeführten Leistung  $P_1 = U_1 \cdot I_1$ .

Daraus folgt:

$$I_2 : I_1 = w_1 : w_2$$

Verluste entstehen durch  $I_1$  und  $I_2$  in den Widerständen der Wicklungen ("Kupfer-Verluste") und durch Verluste beim Ummagnetisieren des Eisenkerns ("Eisen-Verluste").

Außer dem (von der Last auf der Sekundärseite abhängigen) Primärstrom  $I_1$  fließt auf der Primärseite auch noch ein von der Größe der Primärinduktivität abhängiger Blindstrom

$$I_B = U_1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)$$

## Transformatoren: Unterscheidungsmerkmale

Man unterscheidet folgende **Arten von Transformatoren**

### A. Nach der Anwendung:

- Hochspannungstransformator - macht aus kleiner Spannung eine sehr hohe Spannung  
Beispiele: Zündspule beim Auto, Hochspannungserzeugung im Fernsehgerät
- Niederspannungstransformator - macht aus Netzspannung eine ungefährliche Niederspannung (< 42 Volt).  
Beispiele: Klingeltrafo mit 3 / 5 / 8 V oder auch 4 / 8 / 12 Volt  
Stromversorgung von Walkman, Modem und Funkgeräten  
Akku-Ladegerät
- Hochstromtrafo - erzeugt sehr hohe Ströme bei niedriger Spannung  
Beispiele: Schweißtrafo, Schmelztrafo

### B. Nach der Frequenz:

- Netztrafo 50 ... 60 Hz
- Niederfrequenztrafo 20 Hz ... 15 kHz
- Hochfrequenztrafo 1,5 MHz ... 30 MHz

### C. Nach dem Aufbau:

- Trenntrafo: Sekundär- von Primärseite isoliert
- Spartrafo: Sekundär- von Primärseite nicht isoliert
- Stelltrafo: Sekundärspannung ist einstellbar (oft als Spartrafo ausgeführt)

### D. Nach der Technologie:

- EI-Schnitt einfache Herstellung, brummt leicht, recht hohe Verluste
- M-Schnitt etwas kompliziertere Herstellung, weniger Verluste als EI-Schnitt
- Ringkerntrafo geringes Streufeld und geringe Verluste
- Stiefelkörperspulen für HF-Trafos mit schlechter Kopplung
- Schalenkern-HF-Trafo für HF-Anwendungen mit geringen Streuungsanforderungen

## Induktivität einer Schalenkern-Spule

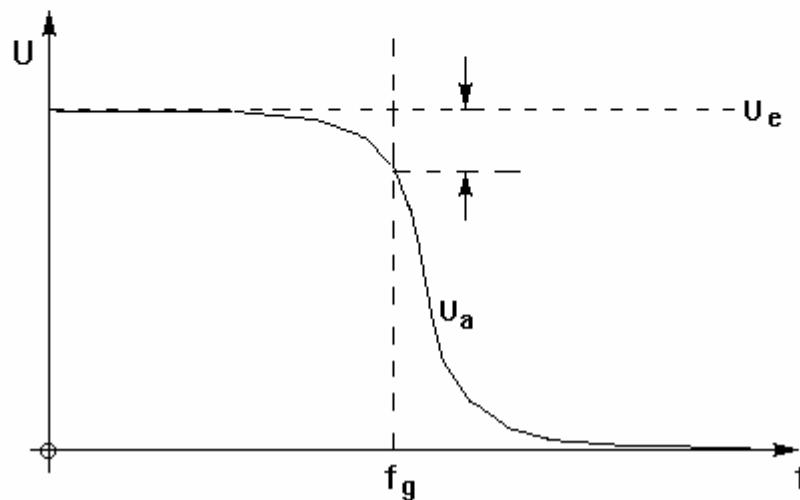
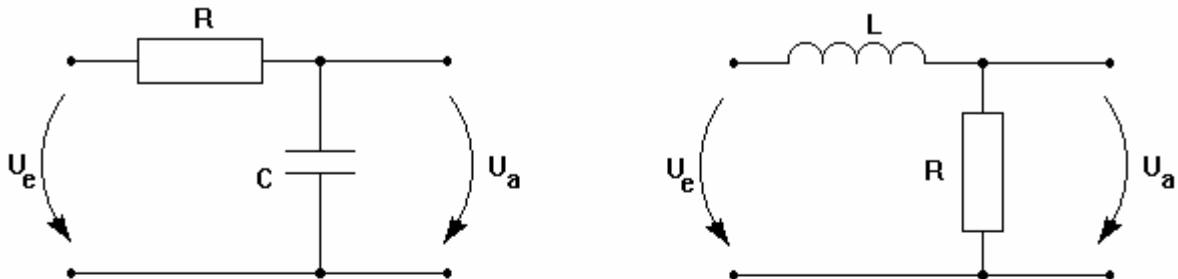
Mit dem Kennwert des Schalenkern-Materials  $A_L$  ist es sehr einfach die Induktivität zu berechnen:

$$L = A_L * N^2$$

Darin ist N die Windungszahl und  $A_L$  der Kennwert, der meist in nH (nano Henry) angegeben wird. Genaugenommen muß die Dimension  $nH/wdg^2$  heißen. Mit einem Kern von 250 nH und 10 Windungen erhält man also eine Induktivität von 25  $\mu H$ .



### Der Tiefpaß (RC, RL)

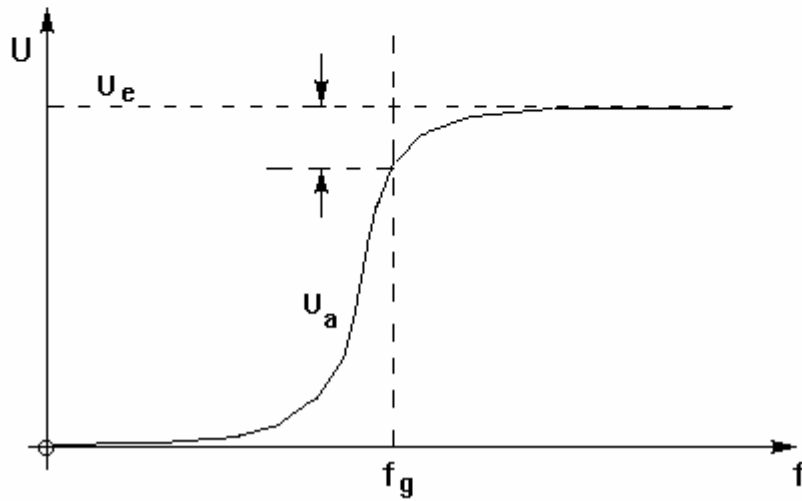
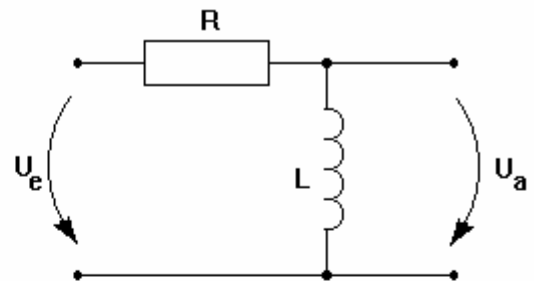
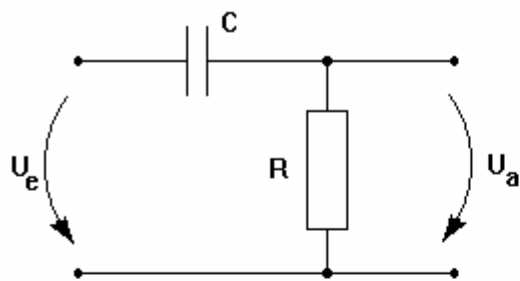


$f_g$  ist die Grenzfrequenz zwischen Durchlassbereich und Sperrbereich. Sie liegt an der Stelle, an der der Blindwiderstand  $X_L$  bzw.  $X_C$  gleich  $R$  ist (3-dB-Grenzfrequenz).

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$f_g = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L}$$

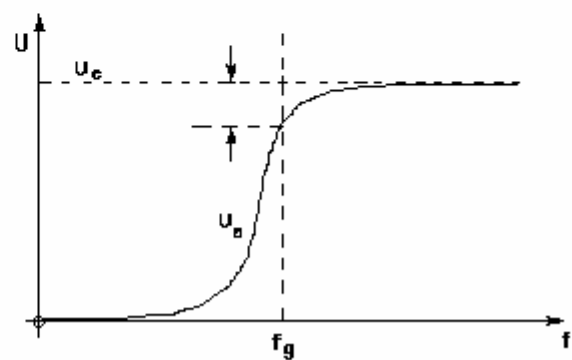
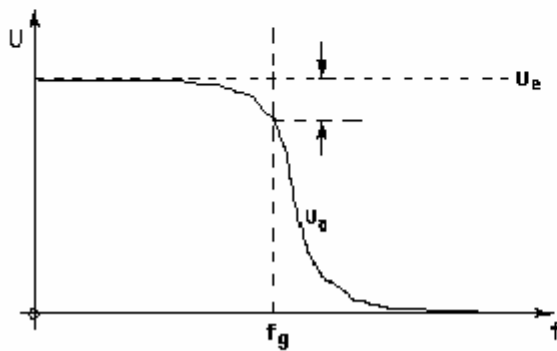
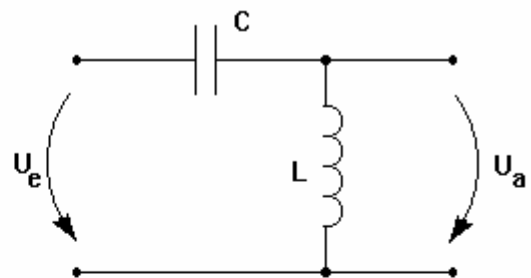
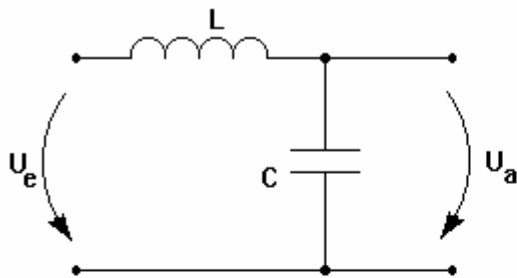
## Der Hochpaß (RC, RL)



$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$f_g = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L}$$

## Tief- und Hochpaß (LC)

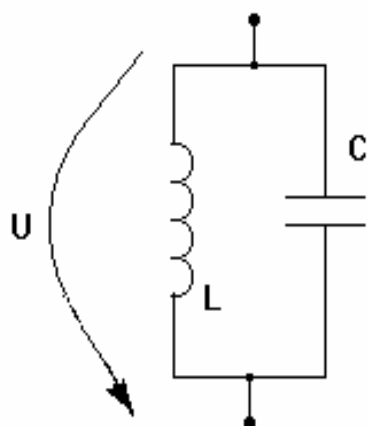


$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Die Grenzfrequenz liegt auch hier bei der Frequenz bei der Induktivität und Kapazität gleiche Blindwiderstände aufweisen.

Fleißaufgabe: Versuche die Formel herzuleiten !

### Parallel-Schwingkreise - Verhalten bei Resonanz



Bei niedrigen Frequenzen ist L \_\_\_\_\_ ,

Bei hohen Frequenzen ist C \_\_\_\_\_ ,

Scheinbar leitet der Kreis \_\_\_\_\_ .

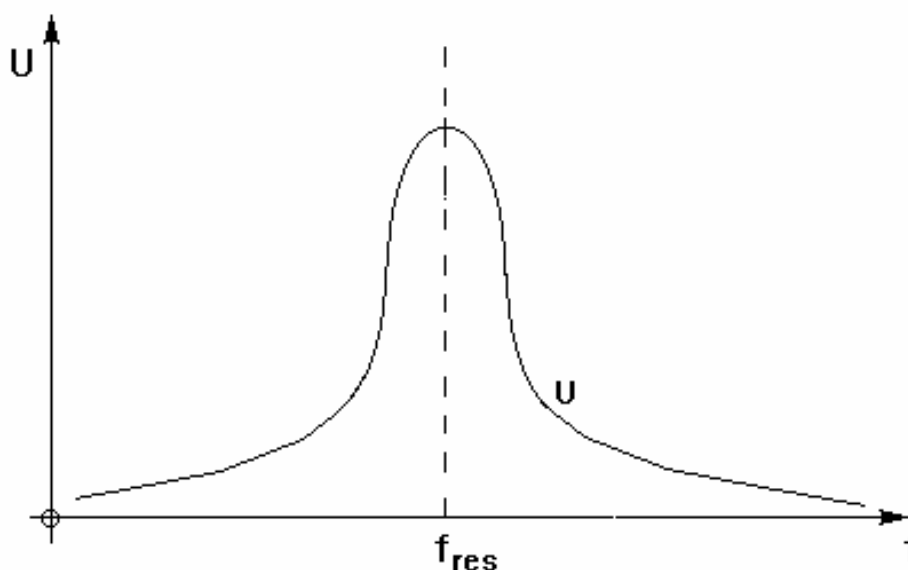
Dies ist auch fast so, jedoch nicht bei einer bestimmten Frequenz, nämlich bei der Resonanzfrequenz  $f_{res}$

Hier wird die Gesamtschaltung sehr hochohmig !

Die  $f_{res}$  ist die Eigenfrequenz des (Resonanz-)Kreises

Wurde einmal eine elektrische Energie in den Resonanzkreis eingebracht, erfolgt zwischen L und C ein ständiger, abwechselnder und rhythmischer Energieaustausch mit der Frequenz  $f_{res}$ . Elektrische Energie im Kondensator (E-Feld) gegen magnetische Energie (H-Feld) in der Induktivität.

Das System schwingt → Schwingkreis !

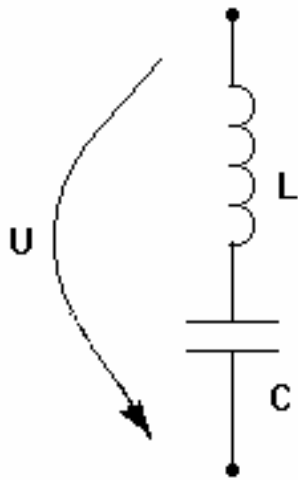


Alle LC-Schwingkreise werden mit der **Thompson'schen Schwingungsformel** berechnet:

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

Sie entsteht, wenn man die Blindwiderstände  $X_L = 2\pi f_{res}L$  und  $X_C = 1/(2\pi f_{res}C)$  gleichsetzt.

## Serien-Schwingkreise - Verhalten bei Resonanz



Bei hohen Frequenzen ist L \_\_\_\_\_ ,

Bei niedrigen Frequenzen ist C \_\_\_\_\_ ,

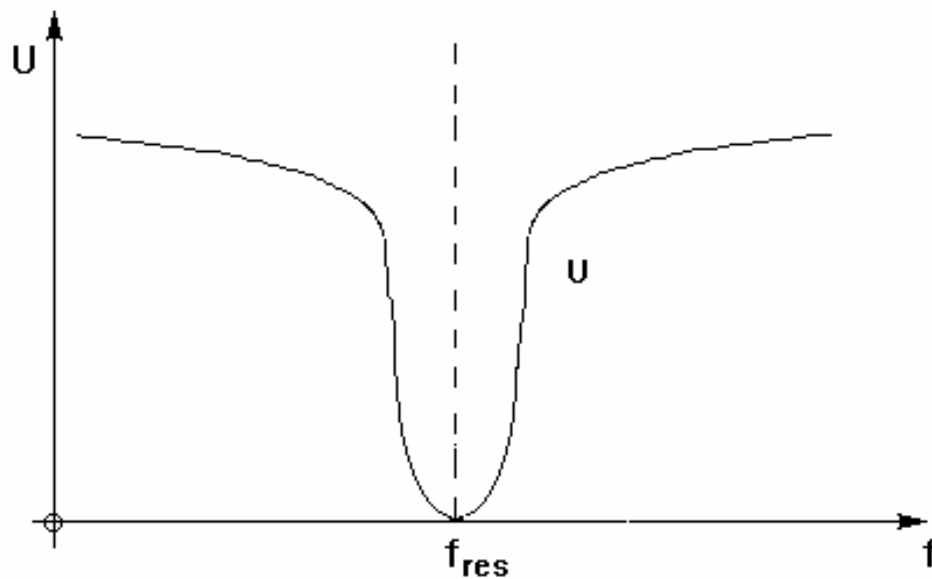
Scheinbar leitet der Kreis \_\_\_\_\_ .

Dies ist auch fast so, jedoch nicht bei einer bestimmten Frequenz, nämlich wiederum bei der Resonanzfrequenz.

Hier heben sich die beiden Reaktanzen  $X_L$  und  $X_C$  gegenseitig auf und die Schaltung wird niederohmig.

Die Spannungen an  $X_L$  und  $X_C$  sind dann gleich groß aber gegenphasig, so daß ihre Summe Null wird.

Auch hier → Schwingkreis !

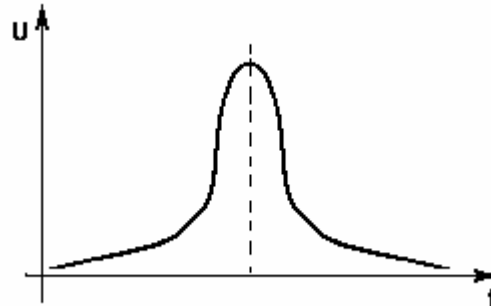
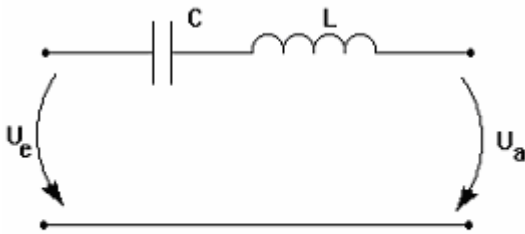


Alle LC-Schwingkreise werden mit der **Thompson'schen Schwingungsformel** berechnet:

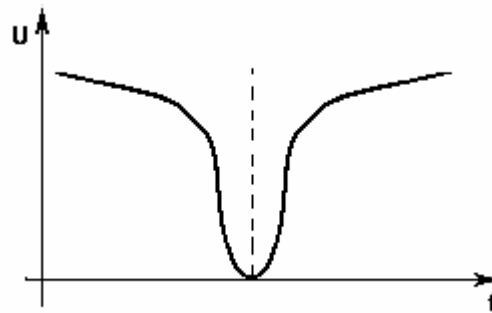
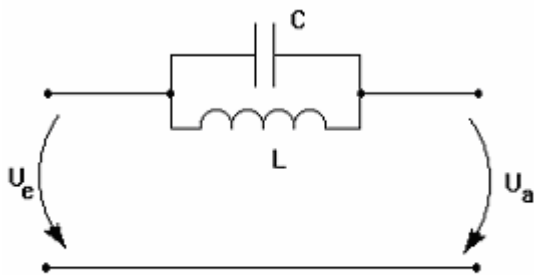
$$f_{res} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

## Schaltungen mit Schwingkreisen

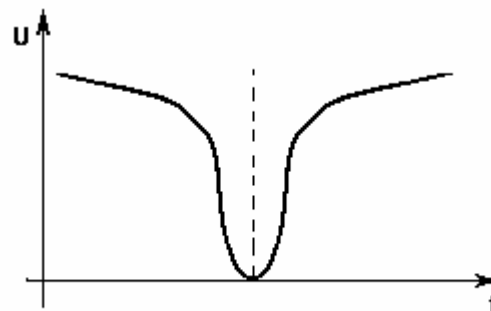
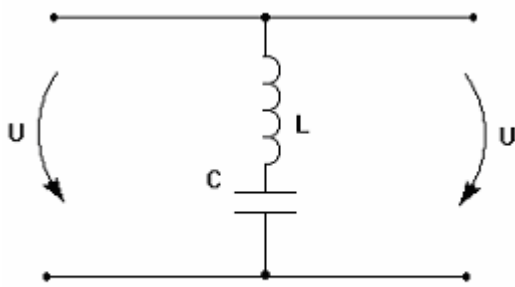
Der Leitkreis



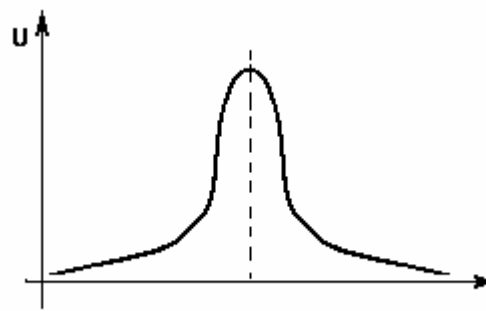
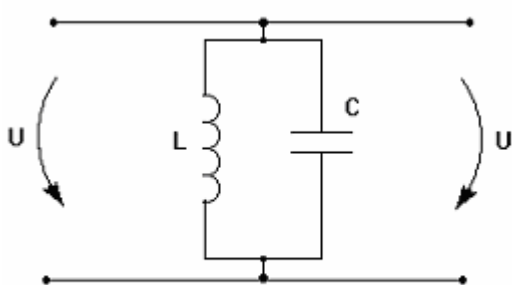
Der Sperrkreis



Der Saugkreis

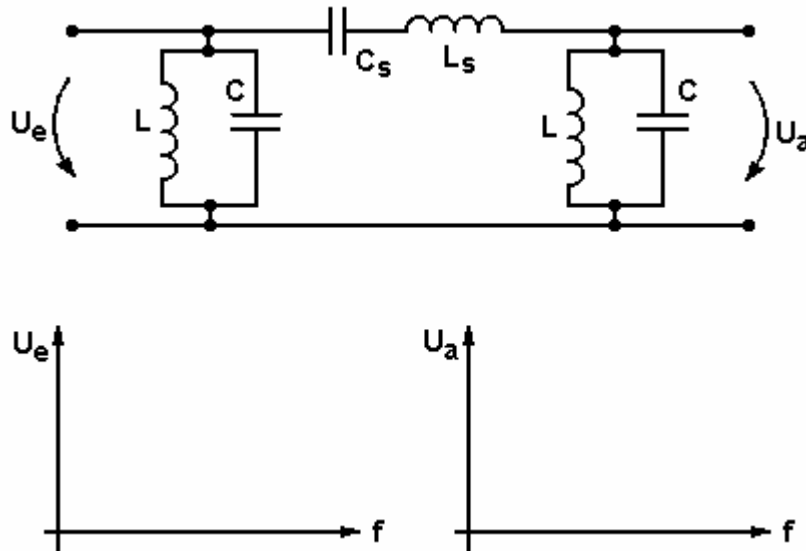


Der Parallelschwingkreis



## Schaltungen mit Schwingkreisen

Kombinierter Bandpaß (3. Grades)



### Bandbreite / Güte eines Schwingkreises

Die **Güte Q** gibt die hochfrequente "Qualität" eines Schwingkreises an.

große Güte Q      ⇔      kleine Bandbreite B  
kleine Güte Q     ⇔      große Bandbreite B

Mit  $\omega_r = 2 * \pi * f_{res} = \frac{1}{\sqrt{L * C}}$  ist der Resonanzblindwiderstand  $X_r = \omega_r * L = \frac{1}{\omega_r * C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$

und  $Q = \frac{R_p}{X_r}$  beim Parallelschwingkreis und  $Q = \frac{X_r}{R_s}$  beim Serienresonanzkreis.

Die Grafik zeigt die Verhältnisse im Frequenzgang eines Parallelresonanzkreises:

