

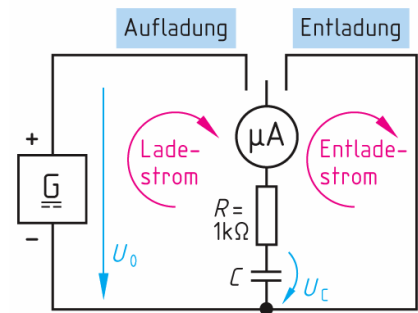
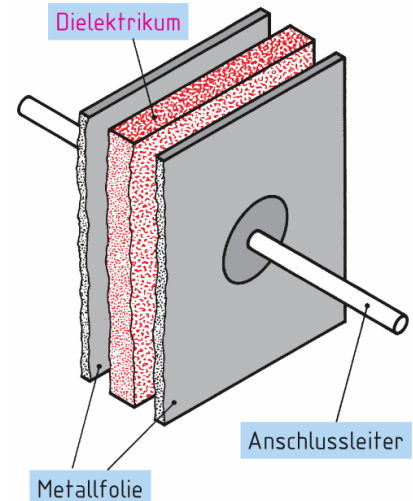
Kondensator

Ein Kondensator besteht im Grundaufbau aus zwei elektrisch leitenden Platten, z.B. Metallfolien, mit einem Isolierstoff dazwischen, dem Dielektrikum.

Beim Laden fließt zu Beginn ein hoher Ladestrom. Während des Aufladens wird der Ladestrom immer kleiner, bis er zu null wird. Dann sperrt der Kondensator den Gleichstrom.

Der Kondensator sperrt nach dem Aufladen den Gleich-

Beim Laden saugt der Spannungserzeuger von einer Platte Elektronen ab und drückt sie auf die andere Platte. Dadurch entsteht auf der einen Platte Elektronenmangel, auf der anderen Platte Elektronenüberschuss. Zwischen den Platten des Kondensators besteht dann eine Spannung, die der angelegten Spannung entgegenwirkt und gleich groß ist. Beim Entladen des Kondensators fließt ein Entladestrom.



Der Kondensator kann elektrische Ladungen speichern.

Kapazität eines Kondensators

Erhöht man die Spannung an einem Kondensator auf den doppelten Wert, so fließt auch die doppelte Ladung auf die Kondensatorplatten. Die Größe Q/U ist konstant. Sie wird **Kapazität C** genannt. Die Einheit Farad ist für die Praxis zu groß. Man verwendet deshalb kleinere Kapazitätseinheiten.

Ein Kondensator hat die Kapazität 1Farad (1F), wenn er von der Ladung 1As um 1V aufgeladen wird ($1F = 1As/V$).

$$C = \frac{Q}{U}$$

$$[C] = \frac{As}{V} = F$$

C Kapazität
Q Ladung
U Spannung

Übersicht: Einheitenvorsätze der Kapazität

- 1 Millifarad = $1mF = 10^{-3}F$
- 1 Mikrofarad = $1\mu F = 10^{-6}F$
- 1 Nanofarad = $1nF = 10^{-9}F$
- 1 Pikofarad = $1pF = 10^{-12}F$



Kondensator

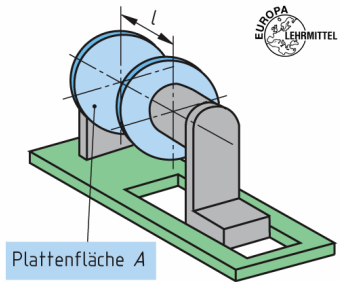
Berechnung der Kapazität von Kondensatoren

Die Kapazität eines Kondensators ist durch seinen Aufbau festgelegt. Bei Vergrößerung der Plattenoberfläche steht den Ladungen eine größere Fläche zur Verfügung. Bei kleinerem Plattenabstand ziehen sich positive und negative Ladungen auf den Platten stärker an. Dadurch drückt die angelegte Spannung mehr Ladung in den Kondensator als bei großem Plattenabstand.

Unter dem Einfluss des elektrischen Feldes richten sich die Moleküldipole im Dielektrikum aus. Diesen Vorgang nennt man dielektrische Polarisation. Dadurch wird je nach Isolierstoff eine bestimmte Menge der ursprünglich vorhandenen Kondensatorladung gebunden. Die Kondensatorplatte kann deshalb eine erhöhte Ladung aufnehmen, bis wieder derselbe Spannungszustand zwischen den Platten erreicht ist wie ohne Verwendung des eingeschobenen Dielektrikums. Die Aufnahme einer größeren Ladung bedeutet eine Vergrößerung der Kapazität. Das Dielektrikum beeinflusst somit die Kapazität des Kondensators.

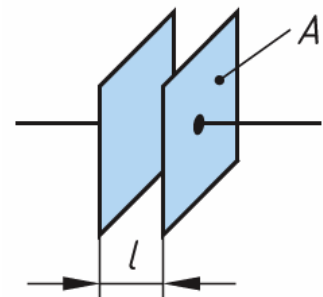
Die Zahl, die angibt, wie viel mal größer die Kapazität eines Kondensators wird, wenn statt Luft ein anderer Isolierstoff verwendet wird, heißt **Permittivitätszahl** ϵ_r des entsprechenden Isolierstoffes (Tabelle).

Die Kapazität eines Kondensators wird umso größer, je größer die Permittivitätszahl, je größer die Plattenfläche und je kleiner der Plattenabstand ist.



Die Kapazität eines Plattenkondensators ist abhängig von:

- Plattenabstand l
- Plattenfläche A
- Permittivitätszahl ϵ_r



$$[C] = \frac{AS}{V} = F \quad C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{l} \quad \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

C = Kapazität
 ϵ_0 = Elektrische Feldkonstante

$$\epsilon_0 = 88510^{12} \frac{AS}{Vm} = 885 \frac{pF}{m}$$

ϵ_r = Permittivitätszahl

A = Plattenfläche

l = Plattenabstand

Tabelle: Permittivitätszahlen von Isolierstoffen

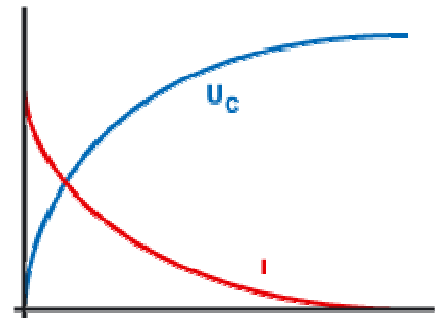
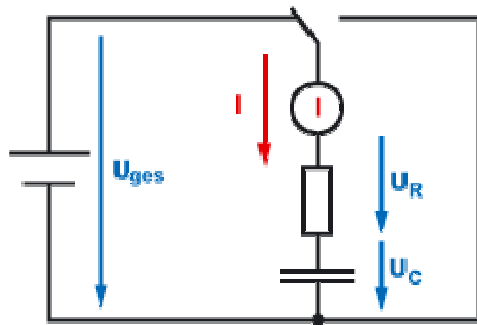
Isolierstoff	ϵ_r
Luft	1
Isolieröl	2 ... 2,4
Silikonöl	2,8
Hartpapier	4 ... 8
Porzellan	5 ... 6
Glas	4 ... 8
Glimmer	6 ... 8
Polystyrol	2,5
Keramik	10 ... 10.000
Polyester	3,3
Polycarbonat	2,8

Kondensator



Kondensator im Gleichstromkreis

Ladevorgang des Kondensators

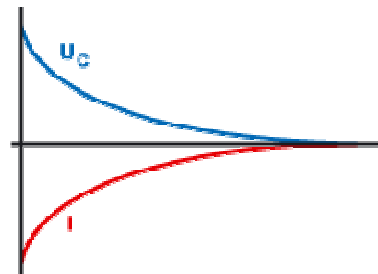
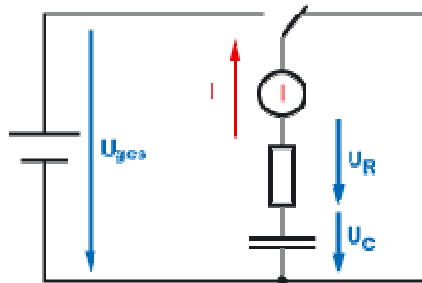


Die Spannungsquelle zieht die Elektronen der oberen Kondensatorfläche an und drückt sie auf die untere Kondensatorfläche. Bei diesem Vorgang wird der Kondensator aufgeladen. Die Verschiebung der Elektronen erzeugt einen Stromfluss, den Ladestrom, der sehr hoch ist. Der Kondensator wirkt in diesem Augenblick wie ein Kurzschluss. Während des Ladevorgangs sinkt der Strom ab und die Spannung (Ladungsunterschied zwischen den Kondensatorflächen) steigt an. Dabei wird der Kondensator hochohmig. Je länger der Ladevorgang dauert, desto weniger Strom fließt. Die Elektronen auf der oberen Fläche werden weniger. Hat die Kondensatorspannung U_C die Ladespannung U_{ges} erreicht, fließt kein Strom mehr und der Kondensatorwiderstand ist unendlich groß. Der Kondensator wirkt wie eine Sperre für den Gleichstrom.



Wenn man das Strommessgerät während des Ladevorgangs beobachtet, so hat es einen kurzzeitigen Ausschlag gegeben, bei dem der Zeiger langsam wieder auf Null zurück gegangen ist. Die Ladung bleibt auch dann erhalten, wenn die Ladespannung U_{ges} entfernt wird. Allerdings entlädt sich der Kondensator trotzdem langsam.

Entladevorgang des Kondensators

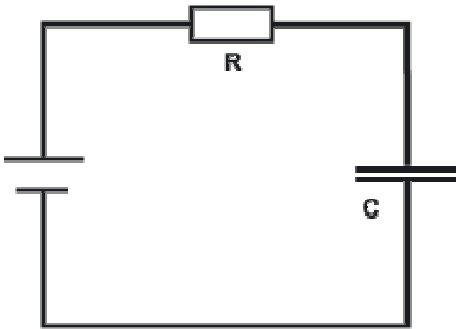


Wird der Kondensator kurzgeschlossen, so entsteht ein Ladungsausgleich. Das heißt, die Elektronen wandern von der unteren Kondensatorfläche zur oberen Kondensatorfläche zurück, bis sie auf beiden Seiten ausgeglichen sind. Es fließt dann ein Entladestrom, der entgegengesetzt zum Ladestrom fließt. Anfangs ist die Spannung und der Ladestrom sehr groß. Beide sinken jedoch sehr schnell auf Null ab. An dem Punkt, wo keine Spannung mehr am Kondensator anliegt und kein Strom mehr fließt, ist der Kondensator entladen.

Wenn man das Strommessgerät während des Entladevorgangs beobachtet, dann kann man einen kurzen Ausschlag des Zeigers erkennen, der allerdings in die gegengesetzte Stromrichtung wirkt und schnell gegen Null zurück geht. Vorsicht bei analogen Zeigermessgeräten.

Kondensator

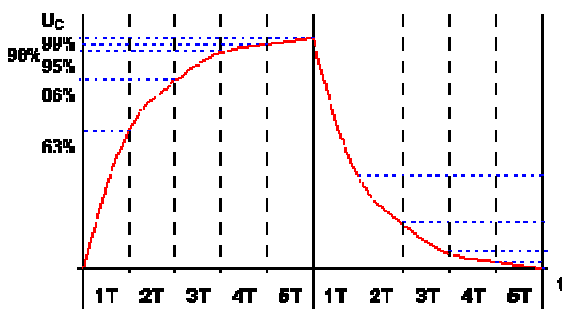
Lade- und Entladezeit des Kondensators



Zur Berechnung der Lade- bzw. Entladezeit wird der Wert des Widerstandes, der den Kondensator auflädt und der Wert des Kondensators benötigt. Die angelegte Spannung hat dabei keinen Einfluss auf die Ladezeit!

Die Aufladung erfolgt umso schneller, je kleiner die Kapazität des Kondensators C und je kleiner der Widerstand R ist.

Berechnung der Ladezeit



Die Ladezeit ist nur von den Größen des Kondensators C und des Widerstandes R Abhängig. Daher wird das Produkt aus Kondensator C und Widerstand R als Zeitkonstante τ (tau) festgelegt.

$$\tau = R \cdot C$$

Innerhalb jeder Zeitkonstante τ (tau) lädt oder entlädt sich ein Kondensator um 63% der angelegten bzw. geladenen Spannung. Nach nur 0,69 τ hat ein Kondensator 50% seiner endgültigen bzw. ursprünglichen Spannung erreicht. Nach 5 Zeitkonstanten ist ein Kondensator fast aufgeladen bzw. fast entladen!
Die Lade- bzw. Entladezeit beträgt 5 τ (tau) bzw. 5 mal Widerstand mal Kapazität.

Möchte man die Höhe der Spannung des Kondensators zu einem bestimmten Lade- bzw. Entladezeitpunktes wissen, dann errechnet man aus der Ladespannung U_{ges} den Prozentwert der Zeitkonstante.

$$1 \tau = U_{C1\tau} = 0,63 \cdot U_{ges} \quad (63\%)$$

$$2 \tau = U_{C2\tau} = 0,86 \cdot U_{ges} \quad (86\%)$$

$$3 \tau = U_{C3\tau} = 0,95 \cdot U_{ges} \quad (95\%)$$

$$4 \tau = U_{C4\tau} = 0,98 \cdot U_{ges} \quad (98\%)$$

$$5 \tau = U_{C5\tau} = 0,99 \cdot U_{ges} \quad (99\% \sim 100\%)$$

Kondensator

Berechnung von Spannungen und Stromstärken beim Laden und entladen eines Kondensators

Der Spannungsverlauf und der Stromverlauf beim Laden und entladen von Kondensatoren folgt einer e- Funktion (e ist die Basis der natürlichen Logarithmen. Beim Taschenrechner ist das die Taste e^x)

Ladevorgang

$$u_c = U_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

$$i_c = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

$$I_0 = \frac{U_0}{R}$$

Momentanwert der Spannung am
 u_c Kondensator

U_0 Ladespannung, Spannung des aufgeladenen Kondensators

E = 2,71828

t = Zeit

τ Zeitkonstante

I_c Momentanwert der Stromstärke

I_0 Anfangsstromstärke

R Widerstand im Stromkreis

Entladevorgang

$$u_c = U_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

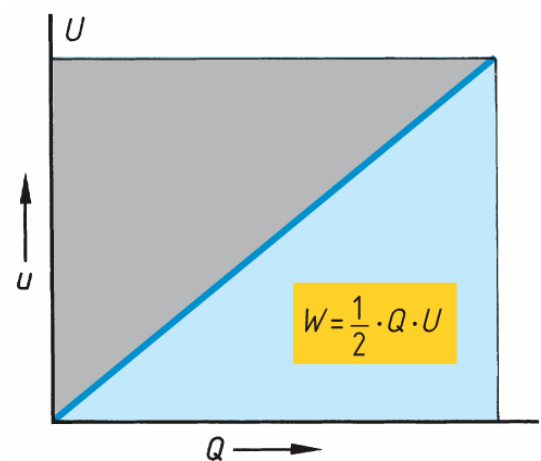
$$i_c = -I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

Energie des geladenen Kondensators

Ein Kondensator wird über einen Widerstand R an eine Gleichspannung geschaltet.

Es fließt ein Strom, bis der Kondensator auf die Spannung U geladen ist. Nun hat der Kondensator die Ladung Q und die Spannung U. Es gilt die Beziehung $Q = C \cdot U$, D.h., die Ladung Q ist der Spannung U verhältnismäßig (Bild).

Die helle Fläche entspricht der Energie W des geladenen Kondensators. Dieses Dreieck hat die Fläche $1/2 \cdot Q \cdot U$. Statt Q wird die Formel $C \cdot U$ eingesetzt. Die elektrische Energie ergibt sich somit zu $W = 1/2 \cdot C \cdot U^2$.



$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad [W] = F \cdot V^2 = \frac{As}{V} \cdot V^2 = AsV = Ws$$

W Elektrische Energie
C Kapazität
U Spannung

Kondensator

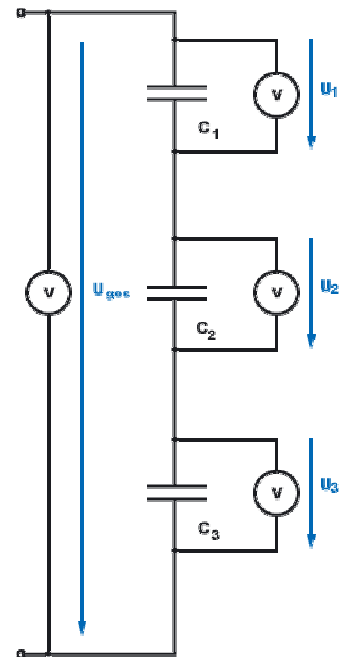
Reihenschaltung von Kondensatoren

Eine Reihenschaltung von Kondensatoren ist dann gegeben, wenn durch alle Kondensatoren der gleiche Strom fließt.

Die Reihenschaltung wirkt wie eine Kapazitätsverringering, vergleichbar mit einer Vergrößerung des Plattenabstands bei gleicher Plattenfläche.

Manchmal nennt man die Reihenschaltung auch Serienschaltung. Egal wie, die Kondensatoren werden immer hintereinander geschaltet.

- Häufig ist eine berechnete Kapazität als Kondensator nicht vorhanden. Statt dessen werden zwei oder mehr Kondensatoren in Reihe geschaltet, um auf den berechneten Wert zu kommen.
- Bei hohen Spannungen werden mehrere Kondensatoren in Reihe geschaltet, um die Gefahr eines Durchschlagens zu verhindern. Hilfreich ist, dass sich die Gesamtspannung an den Kondensatoren aufteilt.



Verhalten der Spannungen

$$U_{ges} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

Die Gesamtspannung U_{ges} teilt sich an den Kondensatoren in der Reihenschaltung auf. Die Summe der Teilspannung ist gleich der Gesamtspannung. An der kleinsten Kapazität fällt die größte Spannung ab. An der größten Kapazität fällt die kleinste Spannung ab.

Verhalten der Kapazität

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Die Gesamtkapazität der Reihenschaltung ist kleiner als die kleinste Einzelkapazität. Durch jeden weiteren Reihenkapazität sinkt die Gesamtkapazität.

Verhalten der Ladungen

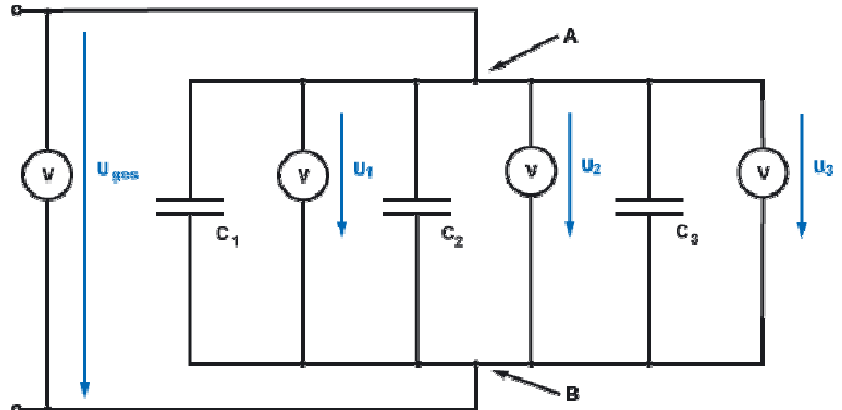
$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

Die Ladungen der Kondensatoren sind gleich groß.

Kondensator

Parallelschaltung von Kondensatoren

Eine Parallelschaltung von Kondensatoren ist dann gegeben, wenn der Strom sich an den Kondensatoren aufteilt und an den Kondensatoren die gleiche Spannung anliegt. An Punkt A teilt sich der Strom auf und an Punkt B fließt er wieder zusammen. Zwischen Punkt A und Punkt B liegt die Gesamtspannung an. Kondensatoren werden sehr häufig parallelgeschaltet, um die Kapazität zu erhöhen. Ein Drehkondensator besteht z. B. aus parallelgeschalteten Kondensatoren.



Verhalten der Spannungen

In der Parallelschaltung von Kondensatoren liegen an allen Kondensatoren die gleiche Spannung an.

$$U_{ges} = U_1 = U_2 = U_3 = \dots$$

Verhalten der Kapazität

Da der Strom die Kondensatoren auflädt, ist die Gesamtkapazität aller Kondensatoren größer als bei jedem einzelnen Kondensator. Die Gesamtkapazität ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

$$C_{ges} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Verhalten der Ladungen

Die Ladung verhält sich gleich, wie die Kapazität. Die Gesamtladung ist gleich der Summe der Einzelladungen.

$$Q_{ges} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

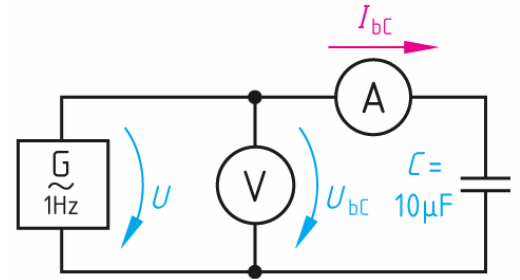
Kondensator

Kondensator im Wechselstromkreis

Kapazitiver Blindwiderstand

Liegt ein Kondensator an sinusförmiger Wechselspannung, so wird dieser entsprechend der Frequenz ständig umgeladen. Am Kondensator entsreht eine Sinusspannung U_{bc} mit gleicher Frequenz wie die des Sinusstromes und somit auch ein Widerstand.

Die Spannung U_{bc} am Kondensator erreicht den Scheitelwert, wenn der Kondensatorstrom $I=0$ ist. Im Zeigerbild eilt der Strom der Spannung um 90 voraus. Durch diese Phasenverschiebung entsteht kein Wirkwiderstand. Deshalb nennt man diesen Widerstand auch kapazitiven Blindwiderstand X_c .



Beim kapazitiven Blindwiderstand eilt der Sinusstrom der Sinusspannung um 90 voraus. Der Kondensator wirkt bei Sinusspannung als Widerstand

Bei größerer Kapazität kann der Kondensator mehr Ladung aufnehmen bzw. abgeben. Dadurch fließt ein größerer Lade- bzw. Entladestrom. Deshalb ist der Blindwiderstand des Kondensators umso kleiner, je größer die Kapazität ist. Der rechnerisch ermittelte Scheinwiderstand Z des Kondensators enthält den Wirkwiderstand des Kondensators und den von der Kapazität abhängigen kapazitiven Blindwiderstand X_c .

Bei höherer Frequenz lädt bzw. entlädt sich der Kondensator bei gleicher Spannung in einer kürzeren Zeit. Dazu ist eine größerer Strom notwendig. Der kapazitiven Widerstand ist daher umso kleiner, je höher die Frequenz ist.

Kapazitiver Blindwiderstand
Bei Sinusspannung:

$$X_c = \frac{U_{bc}}{I} = \frac{1}{\omega \cdot c}$$

$$[C] = \frac{As}{V} = F$$

$$[x_c] = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V}} = \Omega$$

U_{bc} kapazitive Blindspannung

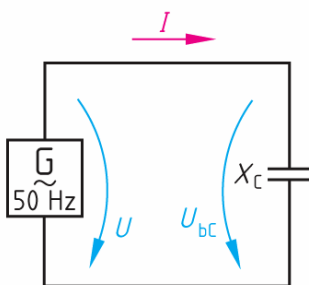
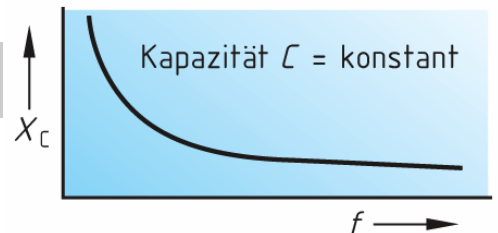
I Strom

X_c kapazitive rBlindwide rs tan d

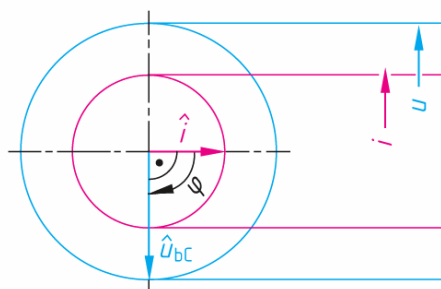
ω Kreisfrequenz ($2 \cdot \pi \cdot f$)

C Kapazität

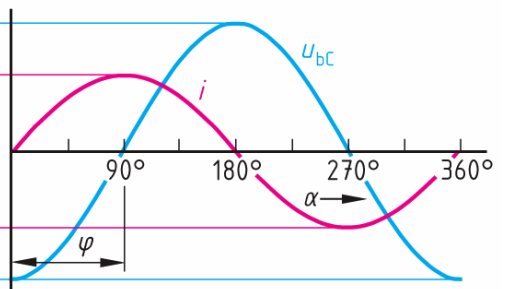
Je größer die Frequenz, desto kleiner ist der Scheinwiderstand



a) Schaltung



b) Zeigerbild



c) Linienbild

Kondensator

Der kapazitive Widerstand eines Kondensators ist umso kleiner, je höher die Frequenz (bzw. Kreisfrequenz) und je größer die Kapazität ist.

Reihenschaltung aus Wirkwiderstand und kapazitivem Blindwiderstand

Schaltet man einen Wirkwiderstand R und einen kapazitiven Blindwiderstand X_C in Reihe an eine Spannung mit sinusförmiger Frequenz, so ist die Wirkspannung U_w phasengleich mit dem Strom I und die kapazitive Blindspannung U_{bC} eilt dem Strom um 90° nach. Deshalb wird im Spannungsdreieck der Zeiger für die Blindspannung U_{bC} gegenüber dem Zeiger für den gemeinsamen Strom I um 90° gedreht gezeichnet, und zwar nachteilend.

Der gemeinsame Strom I eilt der Gesamtspannung U um den Phasenverschiebungswinkel

φ vor. Der Phasenverschiebungswinkel φ wird ausgehend vom Stromzeiger I in Richtung des Spannungszeigers U abgetragen. Der Phasenverschiebungswinkel zeigt in Richtung des Uhrzeigersinns.

Das Widerstandsdreieck und das Leistungsdreieck einer Reihenschaltung erhält man aus dem Spannungsdreieck dadurch, dass man die Zeiger für die gemeinsame Stromstärke dividiert (Ohmsches Gesetz) bzw. multipliziert ($P=U \cdot I$). Daher sind die Dreiecke ähnlich. Die Größen der Dreiecke können nach Pythagoras oder nach den Winkelfunktionen berechnet werden.

Reihenschaltung aus kapazitivem Blindwiderstand und Wirkwiderstand

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}; X_C = \frac{U_{bC}}{I}$$

$$[X_C] = \frac{V}{A} = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \Omega} = \Omega$$

$$U = \sqrt{U_w^2 + U_{bC}^2}$$

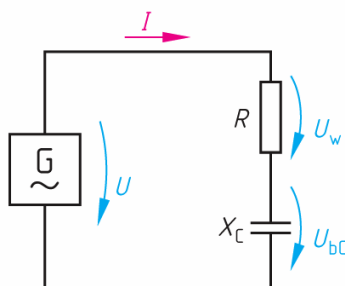
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$Z = \Omega$$

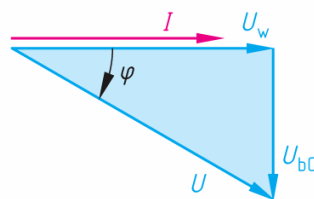
$$S = \sqrt{P^2 + Q_C^2}$$

$$[S] = VA = W$$

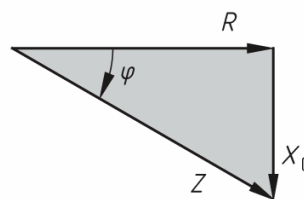
X_C kapazitiver Blindwiderstand, U_{bC} kapazitive Blindspannung, I Strom, C Kondensatorkapazität, Kreisfrequenz, U Gesamtspannung, U_w Wirkspannung, Z Scheinwiderstand, R Wirkwiderstand, S Scheinleistung, P Wirkleistung, Q_C kapazitive Blindleistung



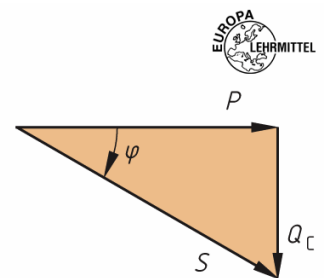
a) Schaltung



b) Spannungsdreieck



c) Widerstandsdreieck



d) Leistungsdreieck

Kondensator

Aufgaben



1. Geben Sie die Kapazität des Kondensators in nF, pF und Farad an!

Bei einem Plattenkondensator wird die Plattenfläche verdoppelt. Wie ändert sich die Kapazität?

Bei einem Plattenkondensator wird der Plattenabstand um 50% verringert. Wie ändert sich die Kapazität?

Bei einem Plattenkondensator wird die Plattenfläche halbiert. Wie ändert sich die Kapazität?

Bei einem Plattenkondensator wird der Plattenabstand verdoppelt verringert. Wie ändert sich die Kapazität?

Ein Plattenkondensator mit dem Plattenabstand 0,5mm hat eine Plattenfläche von 30cm². Welche Kapazität hat der Kondensator, wenn als Dielektrikum Luft ($\epsilon_r = 1$) und danach Hartpapier ($\epsilon_r = 4$) mit 0,5mm Dicke verwendet werden?

Wie lange dauert die Ladezeit eines Kondensators mit einer Kapazität von 10µF bei einem Vorwiderstand von 1MΩ an einer Gleichspannung von 30V?

Ein Kondensator mit 4,7µF liegt in Reihe mit einem Widerstand mit 10KΩ an einer Spannung von 12V DC.

Auf welche Spannung ist der Kondensator nach 10ms aufgeladen?

Welche Ladestromstärke fließt nach 10ms?

Ein Kondensator $C = 100\mu\text{F}$ wird auf $U = 110\text{ V}$ geladen.

Welche Energie hat der Kondensator gespeichert?

Ein kapazitiver Blindwiderstand $X_C = 35\Omega$ liegt mit einem Wirkwiderstand $R = 25\Omega$ in Reihe.

Wie groß ist der Scheinwiderstand Z der Reihenschaltung?