

2. Kondensatoren

2.1 Grundlagen

Kondensatoren sind Bauelemente, die elektrische Ladungen speichern. Der einfachste Kondensator besteht aus zwei metallischen Platten (Elektroden, Beläge), die durch eine isolierende Schicht (Dielektrikum) voneinander getrennt sind (Plattenkondensator; Abb. 2.1). Die Kapazität eines Kondensators ist der Kennwert, der ausdrückt, wieviel Ladung das Bauelement speichern kann. Sie ist um so höher, je größer die Fläche der Elektroden ist, je enger diese zusammenstehen, also je dünner das Dielektrikum ist, und je besser es isoliert.

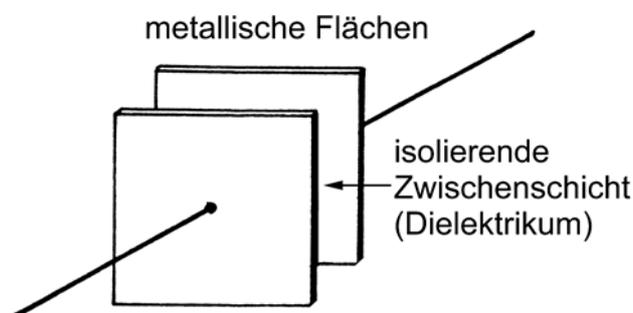


Abb. 2.1 Der Plattenkondensator.

Es gibt Kondensatoren mit fester und mit einstellbarer Kapazität. Die weitere Einteilung bezieht sich einerseits auf die Einsatzgebiete mit ihren besonderen Anforderungen und andererseits auf die Bauform sowie die Art des Dielektrikums. Grundsätzlich ist zwischen gepolten und ungepolten Kondensatoren zu unterscheiden (Abb. 2.2). An ungepolten Kondensatoren darf Wechselspannung anliegen, und es darf Wechselstrom durchfließen. Beide Elektroden sind gleichartig; es spielt keine Rolle, "wie herum" der Kondensator angeschlossen wird. An gepolten Kondensatoren (Elektrolytkondensatoren) darf hingegen nur eine Spannung anliegen, deren Polung sich nicht ändert*. Dabei ist die eine Elektrode (Anode) an das jeweils positivere, die andere (Katode) an das jeweils negativere Potential anzuschließen.

*: In vielen Einsatzfällen ist dies eine mit Wechselspannung überlagerte Gleichspannung.

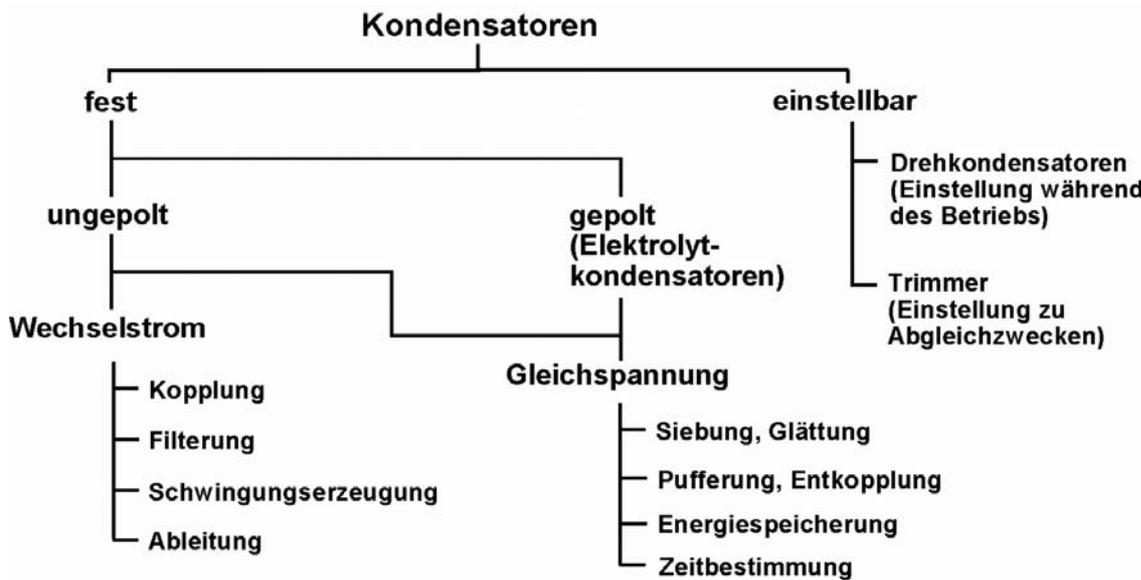


Abb. 2.2 Kondensatoren.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Wirkungen des Kondensators und deren anwendungsseitige Ausnutzung.

Wirkung	Anwendungsbeispiele in Stichworten
Energiespeicherung	<ul style="list-style-type: none"> Glättung pulsierender Spannungsverläufe (Siebkondensator), zusätzlicher Energienachschub bei Stromspitzen, Entkopplung (Stützkondensator), Zwischenspeicher für Spannungswandlung, (Spannungsverdoppler, Ladungspumpe usw.), Spannungsversorgung (Energiespeicherkondensator)
Ladungsspeicherung	zeitweilige Speicherung von Analogwerten; Abtast- und Haltefunktionen
ein Stromimpuls (Laden oder Entladen) bewirkt einen Spannungsverlauf gemäß einer Exponentialfunktion – die Spannung über einem Kondensator kann sich nicht sprunghaft ändern	Glättung; Integrieren; Tiefpaßwirkung
eine Spannungsänderung bewirkt einen Stromfluß, der exponentiell abklingt	Erkennen von und Reagieren auf Änderungen; Differenzieren; Hochpaßwirkung; Funkenlöschung; Entstörung
Sperren von Gleichstrom	Entkopplung; galvanische Trennung; Isolation
Durchleiten von Wechselstrom	Wechselstromkopplung; Ableiten von Störungen

Wirkung	Anwendungsbeispiele in Stichworten
definierter Wechselstromwiderstand bei praktisch unendlich hohem Gleichstromwiderstand (Blindwiderstand; kein Wirkwiderstand, also auch keine Verlustleistung)	(nahezu) verlustlose Spannungsteilung (Abschwächung) von Wechselspannung
der Wechselstromwiderstand sinkt mit steigender Frequenz	<ul style="list-style-type: none"> • Filterwirkungen, • Ableiten von Störungen, • Frequenzgangkompensation
Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung	Schwingungserzeugung; Blindleistungs-, Frequenz- und Phasengangkompensation
Spannungs- und Stromverläufe beim Laden und Entladen in Abhängigkeit von Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$	zeitbestimmende Schaltungen; Verzögerungswirkungen; Formung von Signalverläufen

Tabelle 2.1 Kondensatorwirkungen und deren Ausnutzung.

Der Kondensator erinnert sich – der Nachladeeffekt

Ein Kondensator wird aufgeladen. Dann wird er belastet – bis hin zum Kurzschluß. Somit wird die Ladung wieder abgebaut. An sich sollte der Kondensator vollständig entladen sein, an seinen Anschlüssen sollte also keine Spannung mehr anliegen. Wird nun aber die Belastung aufgehoben, so kann es vorkommen, daß der Kondensator erneut eine Ladung aufweist, die ebenso gepolt ist wie die ursprüngliche. An den – zuvor kurzgeschlossenen – Elektroden liegt dann wieder eine Spannung an (Nachladespannung). Größenordnung: $0,01 \dots 0,1 \cdot$ Betriebsspannung. Der Nachladeeffekt (dielektrische Absorption; Soakage) hängt nicht von der Kapazität und Bauart ab, sondern von der Art des Dielektrikums. Einen besonders geringen Nachladeeffekt haben u. a. Polystyrol, Polypropylen und C0G-Keramik.

2.2.2 Der Kondensator im Schaltplan

In Abb. 2.3 sind die üblichen Schaltsymbole für Kondensatoren zusammengestellt.

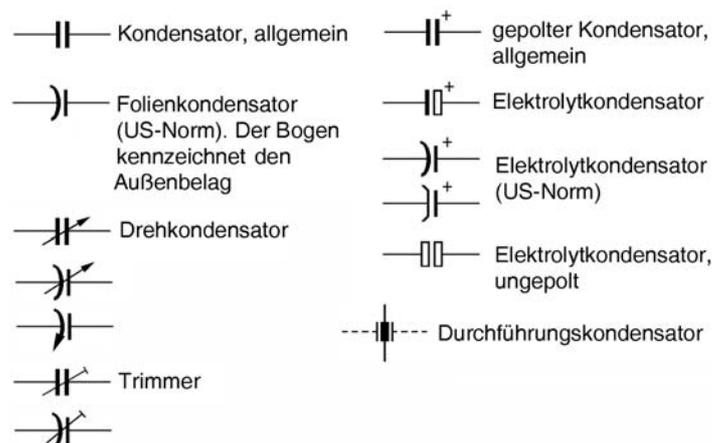
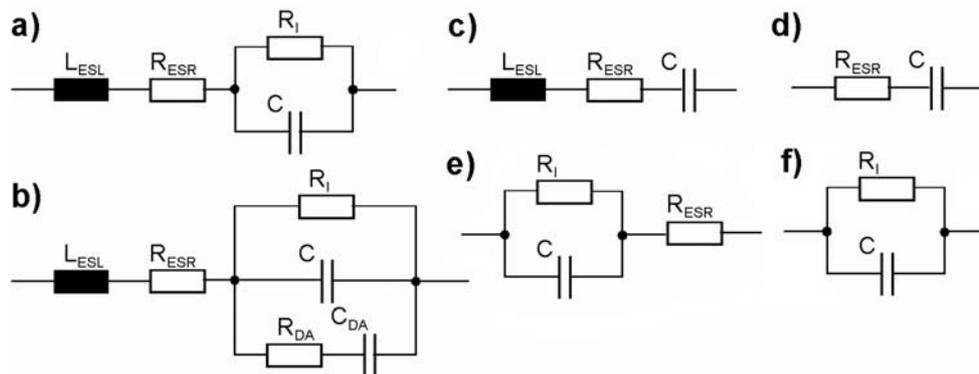


Abb. 2.3 Schaltsymbole für Kondensatoren

2.2.3 Ersatzschaltungen

Abb. 2.4 zeigt verschiedene Ersatzschaltungen für Kondensatoren. Welche davon jeweils in Betracht kommt, hängt von Ausführung, Bauform und Betriebsfrequenz ab.



L_{ESL}	Ersatzserieninduktivität (ESL)
R_{ESR}	Ersatzserienwiderstand (ESR)
R_I	Isolationswiderstand (Leckwiderstand)
C	der ideale Kondensator
R_{DA}	Widerstand der dielektrischen Absorption
C_{DA}	Kapazität der dielektrischen Absorption

Abb. 2.4 Ersatzschaltungen für Kondensatoren. a) ungepolter Kondensator, allgemein; b) zusätzlich mit Berücksichtigung der dielektrischen Absorption (Nachladeeffekt); c), d) ungepolter Kondensator (Wechselstromersatzschaltungen); e), f) Elektrolytkondensator (Gleichstromersatzschaltungen). c) bis f) sind praxisübliche Vereinfachungen. Über ihre Anwendbarkeit entscheidet der jeweilige Einsatzfall und die Größenordnung der Kennwerte.

Das allgemeine Ersatzschaltbild des ungepolten Kondensators (Abb. 2.4a) ergibt sich aus dem grundsätzlichen Aufbau. Der Kondensator besteht aus zwei Elektroden, die durch ein Dielektrikum voneinander getrennt sind. Das Dielektrikum ist kein perfekter Isolator. Der Übergangswiderstand zwischen beiden Elektroden ist der Isolationswiderstand (Leckwiderstand) R_I . Die Elektroden sind – ebenso wie die Zuleitungen und Anschlüsse – keine idealen Leiter. Die entsprechenden ohmschen Widerstände werden zu einem Ersatzserienwiderstand (Equivalent Series Resistance) R_{ESR} zusammengefasst. Aus dem mechanischen Aufbau des Kondensators ergeben sich parasitäre Induktivitäten. Hierzu tragen sowohl die Zuleitungen als auch die Elektrodenanordnung bei (vor allem dann, wenn sie als Wickel ausgeführt ist). Diese Anteile werden zu einer Ersatzserieninduktivität L_{ESL} zusammengefasst.

Der Nachladeeffekt (dielektrische Absorption) kann nicht immer vernachlässigt werden. Im Ersatzschaltbild (Abb. 2.4b) wird er durch einen zusätzlichen Kondensator C_{DA} nachgebildet, der die verbleibende Ladung speichert. Auch dieser Kondensator weist einem Ersatzserienwiderstand R_{DA} auf, der den Entladestrom begrenzt.

In vielen Fällen ist der Nachladeeffekt so gering und der Isolationswiderstand so hoch, daß beide vernachlässigt werden können (Abb. 2.4c); der typische ungepolte Kondensator weist lediglich einen Ersatzserienwiderstand R_{ESR} und eine Ersatzserieninduktivität L_{ESL} auf.

Ist die Frequenz nicht allzu hoch und sind die Zuleitungen kurz (wie beispielsweise bei SMD-Bauformen), so können auch die parasitären Induktivitäten vernachlässigt werden (Abb. 2.4d). Die Reihenschaltung aus Kapazität und Ersatzserienwiderstand ist die Grundlage vieler überschlägiger Berechnungen.

Elektrolytkondensatoren werden nicht mit Wechselspannung betrieben. Deshalb kann man in vielen Einsatzfällen die parasitären Induktivitäten vernachlässigen (Gleichspannungsersatzschaltungen). Der Leckwiderstand R_l kann aber typischerweise nicht vernachlässigt werden (Abb. 2.4e, f).

2.2.4 Kennwerte

Bezugstemperatur (Nenntemperatur)

Die Kennwerte sind temperaturabhängig. Wertangaben werden deshalb auf eine Nenntemperatur bezogen. Typische Werte: + 20 °C, + 23 °C, + 25 °C .

Kapazitätswert (Nennwert)

Kondensatoren werden in einer Vielzahl genormter, abgestufter Nennwerte gefertigt. Die genormten Nennwerte sind in den E-Reihen vorgegeben. Ist die Kapazität einstellbar, bezeichnet der Nennwert den größten einstellbaren Kapazitätswert.

Der Bereich der angebotenen Nennwerte erstreckt sich – über alles gesehen – von unter 1 pF bis zu über 100 F. In der Schaltungspraxis der Elektronik hat man es vor allem mit Nennwerten zwischen einigen pF und einigen tausend μ F zu tun..

Die Nennwertangabe betrifft den unbelasteten Kondensator bei Nenntemperatur. Der tatsächliche Kapazitätswert im praktischen Betrieb hängt von der Genauigkeit, mit der das Bauelement gefertigt wurde (Toleranz), und von den Einsatzbedingungen ab (Belastung, Umgebungstemperatur).

Isolationswiderstand und Leckstrom

Beide Angaben bezeichnen im Grunde dasselbe. Zu ungepolten Kondensatoren wird zumeist der Isolationswiderstand angegeben, zu Elektrolytkondensatoren der Leckstrom. Ein niedriger Leckstrom entspricht einem hohen Isolationswiderstand und umgekehrt. Der Isolationswiderstand sinkt mit steigender Temperatur.

Hinweise:

1. Manche Dielektrika (z. B. Keramiken) haben einen so hohen Isolationswiderstand, daß er zumeist vernachlässigt werden kann. Der Isolationswiderstand solcher Kondensatoren entspricht weitgehend dem Oberflächenwiderstand der Umhüllung.
2. Leckstromangaben sind vor allem bei Elektrolytkondensatoren von Bedeutung. Der Leckstrom ist keine Konstante. Er hängt u. a. von der Dauer der stromlosen Lagerung und von der Betriebszeit ab (Näheres s. S. ***). Leckstromangaben betreffen u. a. den Betriebsbeginn nach längerer stromloser Lagerung, 1, 2 oder 5 Minuten Betriebszeit und den Dauerbetrieb (mehr als 1 Stunde Betriebszeit). Für die Prüfbedingungen gibt es internationale Standards.

Ersatzserienwiderstand

Der Ersatzserienwiderstand (Equivalent Series Resistance ESR, R_{ESR}) ist ein Pauschalwert für den effektiven ohmschen Widerstand zwischen den Anschlüssen des Kondensators. Er gibt Auskunft darüber, wie gut der Kondensator niederfrequente Wechselströme durchleiten kann.

Verlustfaktor

Der ideale Kondensator ist ein reiner Blindwiderstand; der Strom eilt der Spannung um 90° voraus. Jeder reale Kondensator hat aber induktive und ohmsche Widerstandsanteile, so daß sich eine entsprechend geringere Phasenverschiebung ergibt; der Phasenwinkel φ ist kleiner als 90° . Die Differenz zum idealen Phasenwinkel von 90° ist der Verlustwinkel δ . Der Verlustfaktor $\tan \delta$ ist das Verhältnis vom ohmschen zum kapazitiven Widerstand (bzw. vom Wirk- zum Blindwiderstand) bei einer bestimmten Frequenz. Der Verlustfaktor ist frequenzabhängig. Er wird beispielsweise für eine Frequenz von 1 kHz bei einer Umgebungstemperatur von $+ 20^\circ\text{C}$ angegeben. In manchen Datenblättern hat die Verlustfaktorangabe (Dissipation Factor DF) die Form $100 \cdot \tan \delta$ (Prozentangabe) oder $\tan \delta \cdot 10^{-4}$.

Gütefaktor

Der Gütefaktor Q kennzeichnet das Verhältnis der im Kondensator gespeicherten Energie zu den Energieverlusten. Die Angabe ist der Kehrwert des Verlustfaktors $\tan \delta$. Q wird definiert als Verhältnis von Blindwiderstand zu Ersatzserienwiderstand:

$$Q = \frac{X_C}{R_{\text{ESR}}} = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.21)$$

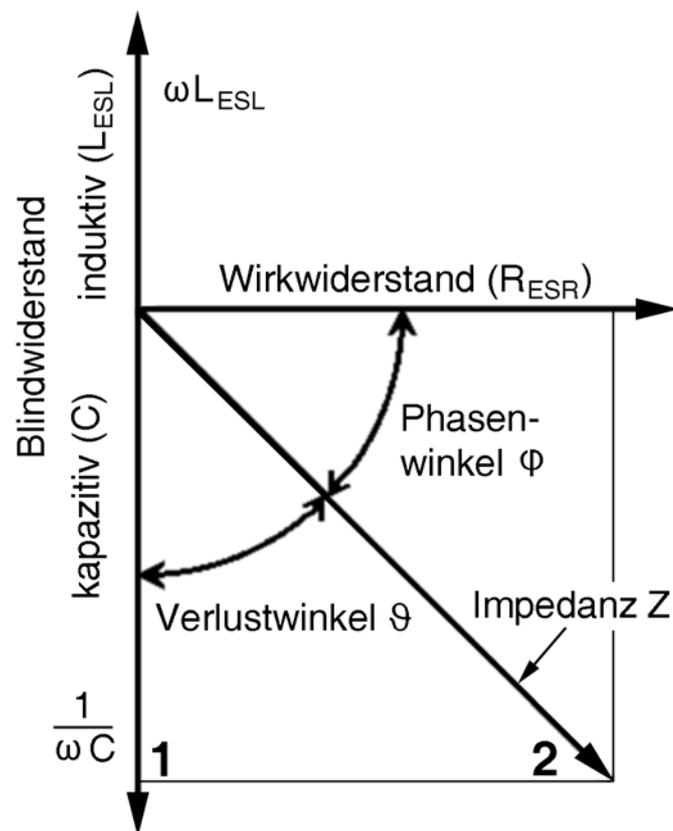


Abb. 2.5 Der Verlustwinkel im Zeigerdiagramm. 1 - der ideale Kondensator hat keinen Wirk-, sondern nur einen Blindwiderstand. 2 - die parasitären ohmschen und induktiven Widerstände im Kondensator wirken sich derart aus, daß Strom und Spannung nicht mehr um 90° gegeneinander phasenverschoben sind, sondern um einen Phasenwinkel $\varphi < 90^\circ$. Der Verlustwinkel δ ergibt sich zu $90^\circ - \varphi$.

Leistungsfaktor und Verlustwinkel:

$$\cos \varphi = \sin \delta$$

$$\tan \delta = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} \quad (2.22)$$

$$\cos \varphi = \frac{\tan \delta}{\sqrt{1 + \tan^2 \delta}}$$

Verlustfaktor und Ersatzserienwiderstand R_{ESR} sind wechselseitig definiert:

$$\tan \delta = \frac{R_{\text{ESR}}}{X_C} = R_{\text{ESR}} \cdot 2 \pi f C = R_{\text{ESR}} \cdot \omega C \quad (2.23)$$

$$R_{\text{ESR}} = X_C \cdot \tan \delta = \frac{\tan \delta}{\omega C} = \frac{X_C}{Q} = \frac{1}{Q \cdot \omega C} \quad (2.24)$$

Alternativ kann der Ersatzserienwiderstand aus dem Scheinwiderstand (Impedanz Z ; s. ***) und dem Phasenwinkel bestimmt werden (vgl. auch Abb. 2.10):

$$R_{\text{ESR}} = Z \cdot \cos \varphi \quad (2.25)$$

Nenngleichspannung

Die Nenngleichspannung (Nennspannung; Rated Voltage U_R ; Working Voltage) ist der höchste Spannungswert, der über dem Kondensator ständig anliegen darf. Die Angabe betrifft die Überlagerung von Gleich-, Wechsel- und Impulsspannungen. Sie gilt im Bereich von der unteren Grenztemperatur bis zur Nenntemperatur. Richtwerte: von 1,8 V bis ca. 15 000 V.

Dauergrenzspannung

Die Dauergrenzspannung (Category Voltage U_C) ist der höchste Spannungswert, der über dem Kondensator ständig anliegen darf, wenn die Umgebungstemperatur der oberen Grenztemperatur entspricht. Die Angabe betrifft die Überlagerung von Gleich-, Wechsel- und Impulsspannungen.

Nennwechselfspannung

Die Nennwechselfspannung (Rated AC Voltage U_{Rac}) ist der höchste quadratische Mittelwert (RMS) der Wechselfspannung einer bestimmten Frequenz (z. B. 50 Hz), der über dem Kondensator ständig anliegen darf (betrifft ungepolte Kondensatoren). Sie gilt im Bereich von der unteren Grenztemperatur bis zur Nenntemperatur.

Die Nennwechselfspannung eines Kondensators ist wesentlich geringer als die Nenngleichspannung. Der Wechselfspannungskennwert bezieht sich typischerweise auf eine Frequenz von 50 Hz.

Nachladespannung, dielektrische Absorption

Dieser Kennwert ist typischerweise eine Prozentangabe, die sich auf die Arbeitsspannung bezieht. Der entsprechende Spannungswert kann an den Anschlüssen des Kondensators wieder auftreten, nachdem er vollständig entladen wurde.

2.3 Ungepolte Kondensatoren

2.3.1 Bauformen

Wickelkondensatoren

Der Wickelkondensator ist ein länglicher Plattenkondensator, der aus dünnen und flexiblen Werkstoffen besteht, die zu einem Wickel gerollt werden. In einer alternativen Ausführung

wird die Anordnung aus Folienbändern nicht aufgewickelt, sondern so gefaltet, daß eine Art Block entsteht. Die Bauformen unterscheiden sich in der Art des Dielektrikums, in der technischen Realisierung der Beläge und in deren Kontaktierung:

- Das Dielektrikum besteht entweder aus imprägniertem Papier oder aus einer Kunststoff-Folie.
- Die Beläge sind entweder Metallfolien (vorzugsweise Aluminium) oder sie werden als Metallbelag auf das Dielektrikum aufgedampft.
- Die Beläge sind an ihren Enden oder an den Stirnseiten des Wickels mit den Anschlüssen des Bauelements verbunden.

Die Beläge der herkömmlichen Wickelkondensatoren werden an ihren Enden mit Anschlußdrähten verbunden. Das hat zwei Nachteile:

- a) der Widerstand ist vergleichsweise hoch, da die Beläge sehr dünn sind, also eine geringe Querschnittsfläche haben (die Ladungsträger müssen vom Anschluß bis ans Ende des Wickels fließen).
- b) die Induktivität ist vergleichsweise hoch, da der Wickel eine Art Spule darstellt.

Induktivitätsarme Bauformen kontaktieren deshalb die Beläge an den Stirnflächen des Wickels. Hierdurch werden die Spulenwindungen praktisch kurzgeschlossen, und der ohmsche Widerstand wird deutlich vermindert (die Ladungsträger fließen nicht mehr längs durch den Wickel, sondern quer). Damit das funktioniert, wird der eine Belag nach links versetzt (ragt also über das Dielektrikum hinaus) und der andere nach rechts.

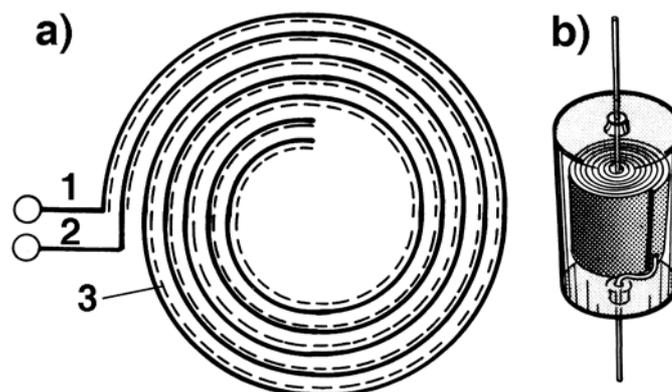


Abb. 2.6 Wickelkondensator. a) prinzipieller Aufbau; b) Ausführungsbeispiel.; 1 - Außenbelag; 2 - Innenbelag; 3 - Dielektrikum. Das Dielektrikum muß doppelt vorhanden sein (jeder Belag hat eine eigene Schicht), um die einzelnen Lagen gegeneinander zu isolieren.

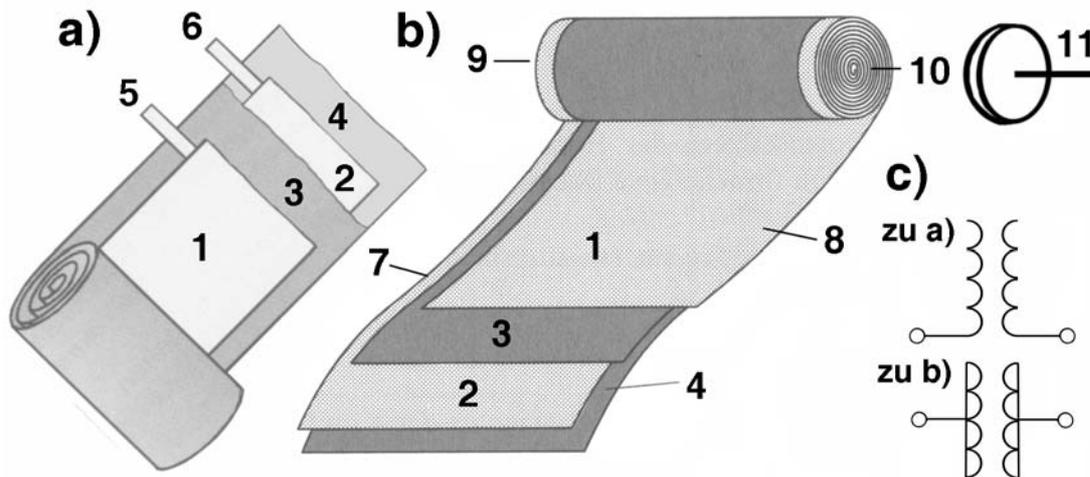


Abb. 2.7 Wickelkondensatoren. a) herkömmliche; b) induktivitätsarme Bauform; c) Ersatzschaltbilder in Hinsicht auf die parasitäre Induktivität. 1 - Innenbelag; 2 - Außenbelag; 3, 4 - Folien (Dielektrikum); 5 - Anschluß Innenbelag; 6 - Anschluß Außenbelag; 7 - Außenbelag nach links versetzt; 8 - Innenbelag nach rechts versetzt; 9 - Kontaktfläche Außenbelag; 10 - Kontaktfläche Innenbelag; 11 - Endkappe mit Anschlußdraht.

Selbstheilung

Das ist eine typische Eigenschaft verschiedener Wickelkondensatoren. Schlägt der Kondensator durch, so verdampft das Metall in der Umgebung der Durchschlagstelle. Was dem Dielektrikum zustößt, hängt u. a. vom Werkstoff und der umgesetzten Energie ab. Manchmal wird das Dielektrikum durchlöchert, manchmal nicht. Die Schadstelle im Dielektrikum bleibt aber stets kleiner als die freigewordenen Flächen in den Belägen. Somit gibt es keinen Schluß zwischen beiden Elektroden. Richtwerte: Dauer eines Selbstheilvorgangs: ca. 10 μ s; Kapazitätsverlust < 100 pF.

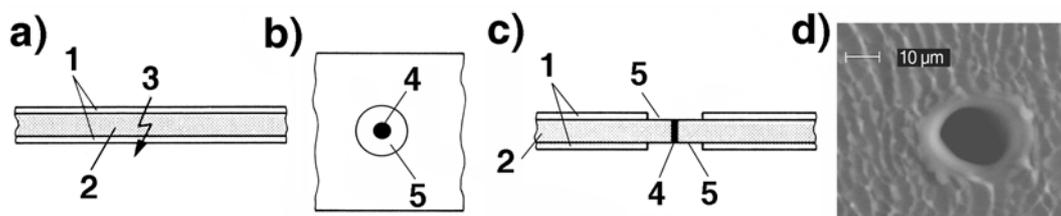


Abb. 2.8 Selbstheilung (Prinzip). Kondensatoranordnung im Querschnitt; b) Draufsicht auf Durchschlagstelle; c) Durchschlagstelle im Querschnitt; d) Ansicht einer Durchschlagstelle (nach [2.4]). 1 - Beläge; 2 - Dielektrikum; 3 - Durchschlag; 4 - Durchschlagstelle im Dielektrikum; 5 - kein Belag (verdampft).

Die Selbstheilung funktioniert nur in Typen mit aufgedampftem Metallbelag (Metallpapier- oder Metallfolientypen). Die Gefahr, daß bei solchen Durchschlägen Rückstände bleiben, ist allerdings immer gegeben. Solche Rückstände können Übergangswiderstände zwischen den Belägen bilden, wodurch sich der Kondensator übermäßig erwärmt (wenn er nicht gar

explodiert oder brennt). Von besonderer Bedeutung hierbei ist Kohlenstoff, der sich bei den Durchschlags- und Abschmelzvorgängen bildet. Den geringsten Kohlenstoffanteil hat Papier. Die weitere Reihenfolge (nach [2.6]): Polyester, Polypropylen, Polycarbonat, Polystyrol. Deshalb werden für Anwendungen, in denen es auf die Selbstheilung ankommt (z. B. X- und Y-Kondensatoren) Metallpapier- oder Polyester-Metallfolientypen bevorzugt. Größere Metallpapierkondensatoren (μF) können tausend Durchschläge und mehr wegstecken, ohne daß die Kapazität wesentlich abfällt.

Schichtkondensatoren

Der Schichtkondensator ist ein in Stücke geschnittener Plattenkondensator, dessen Teile übereinandergestapelt und an den Rändern verbunden werden. Das Dielektrikum besteht typischerweise aus einer Kunststoff-Folie, aus keramischen Werkstoffen, aus Glimmer oder aus Glas. Der besondere Vorteil dieser Bauform ist die geringe Induktivität.

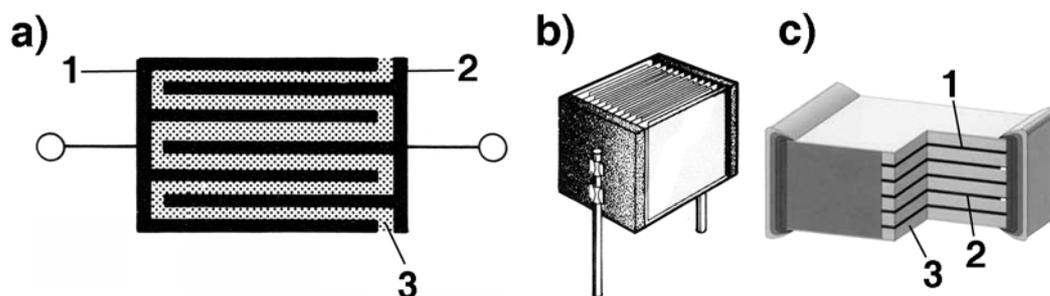


Abb. 2.9 Schichtkondensator. a) prinzipieller Aufbau; b) mit Drahtanschlüssen, c) Keramik-Vielschichtkondensator in SMD-Ausführung. 1 - Außenbelag; 2 - Innenbelag; 3 - Dielektrikum.

2.3.2 Folien- und Metallpapierkondensatoren

Metallpapierkondensatoren

Metallpapierkondensatoren (MP-Kondensatoren) sind Wickelkondensatoren, die eine imprägnierte Papierschicht als Dielektrikum haben. Das Papier ist mit einer Metallschicht bedampft. Solche Kondensatoren sind für den Betrieb an Netzwechselspannung vorgesehen. Typische Kapazitäten liegen zwischen 470 pF und 47 μF .

Folienkondensatoren

Folienkondensatoren haben eine Kunststoff-Folie als Dielektrikum. Die Elektroden (Beläge) des Kondensators werden durch Metallfolien oder durch aufgedampfte Metallschichten gebildet. Es werden sowohl Wickel- als auch Schichtkondensatoren gefertigt. Die Eigenschaften des Kondensators werden maßgeblich vom Folienmaterial bestimmt. Im Laufe der Zeit haben die Hersteller nahezu alles eingesetzt, was die chemische Industrie liefern kann. Ab und zu kommt Neues, und es gibt auch Werkstoffkombinationen (z. B. Polyester und Polypropylen im Verbund).

Typische Folienwerkstoffe:

- Polyester (z. B. Mylar),
- Polypropylen,
- Polycarbonat (z. B. Makrofol),
- Polystyrol (z. B. Styroflex),
- Polyphenylensulfid,
- Polytetraflouräthylen (z. B. Teflon).

Kondensatoren auf Grundlage aufgedampfter Metallschichten (Metallized Film Capacitors) unterscheiden sich von Typen, in denen Beläge und Dielektrikum verschiedene Folien sind (Film/Foil Capacitors), in folgenden Punkten:

- geringere Spannungen und Ströme,
- kleine Bauformen,
- höherer Verlustfaktor,
- geringerer Isolationswiderstand,
- selbstheilend.

Anwendung: bis zu mäßig hohen Frequenzen (einige hundert kHz).

2.3.3 Keramische Kondensatoren

Keramische Werkstoffe ermöglichen induktivitätsarme Bauformen, die für Impuls- und Hochfrequenzanwendungen gut geeignet sind. Es gibt zwei unterschiedliche Ausführungen:

a) Klasse 1, NDK, Stable K

NDK = niedrige Dielektrizitätskonstante (Richtwert: $> 10 \dots 500$). Mit solchen Werkstoffen werden kleinere Kapazitätswerte gefertigt (Größenordnung: von 0,5 pF bis 10 nF). Diese werden mit geringen Toleranzen eingehalten; Temperaturkoeffizient und Verluste sind niedrig. Es gibt praktisch keine Alterung. Anwendung: frequenzbestimmende Kondensatoren, Filterschaltungen usw.

b) Klasse 2, HDK, High K

HDK = hohe Dielektrizitätskonstante (Richtwert: $500 \dots > 100\,000$). Hiermit kann man Kapazitäten zwischen etwa 1 nF und 1 μ F bei geringen Abmessungen fertigen. Der wesentliche Vorteil: ein geringer Ersatzserienwiderstand ESR (Richtwert: 0,1 Ω). Solche Bauelemente haben allerdings höhere Toleranzen, höhere Verluste und einen beträchtlichen, ausgeprägt nichtlinearen Temperaturgang – man gibt gar keinen richtigen Temperaturkoeffizienten an*, sondern spezifiziert pauschal die Kapazitätsänderung über den gesamten Temperaturbereich (Richtwert: $\pm 20\%$ und mehr). Auch die Alterung ist nicht zu vernachlässigen. Zudem weisen sie piezoelektrische Effekte auf; sie reagieren sie auf mechanische Schwingungen (Mikrofonieeffekt)**, und bei Erregung mit Frequenzen im Hörbereich können sie als Schallgeber wirken. Anwendung: Stütz-, Entkopplungs- und

Durchführungskondensatoren. Für echte "analoge" Anwendungen – bei denen es auf Beständigkeit der Kennwerte (Stabilität) ankommt – sind sie nicht geeignet.

*: Versuche zur Temperaturkompensation sind also zwecklos.

** : Das kann u. a. dann ein Problem sein, wenn die betreffende Einrichtung mechanischen Schwingungen ausgesetzt ist, z. B. bei Einbau im Kraftfahrzeug oder in der Nähe von Motoren, Lautsprechern usw.

Richtwerte:

- Klasse 1:
 - Scheibentypen: 1 pF...22 nF,
 - Vielschichttypen: 0,5 pF...3,3 nF.
- Klasse 2:
 - Scheibentypen: 1,8 pF...220 nF,
 - Vielschichttypen: 0,1 pF... 1500 μ F.

Neben Einzelkondensatoren werden auch Mehrfachanordnungen (Kondensator-Arrays) mit beispielsweise zwei oder vier Kondensatoren angeboten.

Kapazität und Gleichspannung

Kondensatoren aus Klasse-1-Werkstoffen weisen eine nur geringe (oftmals vernachlässigbare) Spannungsabhängigkeit der Kapazität auf.

Bei Werkstoffen der Klasse 2 ergibt sich hingegen eine merkliche Spannungsabhängigkeit der Kapazität – je höher die Dielektrizitätskonstante, desto stärker.

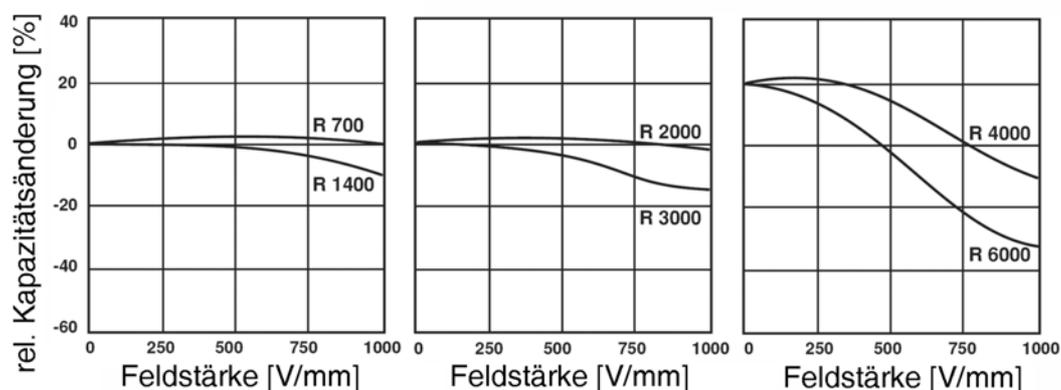


Abb. 2.10 Die Abhängigkeit der Kapazität von der anliegenden Gleichspannung (nach [2.7]).

Industriestandards

Einige wenige Dielektrika haben den Charakter von Industriestandards. Die weitaus meisten keramischen Kondensatoren werden mit diesen Werkstoffen gefertigt. Typische Beispiele:

Klasse 1: COG (NP0)

Der Temperaturkoeffizient beträgt theoretisch Null, praktisch bis zu ± 30 ppm/°C. Kapazität und Verlustfaktorsind kaum von der Frequenz und von der Spannung abhängig. Es gibt keine Alterung. Der Nachladeeffekt ist vernachlässigbar. Kondensatoren aus diesen Werkstoffen sind die einzigen Keramiktypen, die für Abtast- und Halteschaltungen geeignet sind.

Klasse 2: X5R und X7R

Mit diesen Werkstoffen werden die Wald-und-Wiesen-Typen gefertigt, die in großen Stückzahlen als Koppel-, Sieb- und Stützkondensatoren eingesetzt werden.

Klasse 2: Z5U

Z5U ermöglicht es, Kondensatoren mit sehr hoher Packungsdichte zu fertigen – allerdings auf Kosten der Toleranz und der Langzeitstabilität. Einsatz z. B. als Stützkondensatoren in Digitalschaltungen.