

1.3 Kondensatoren

1.3.1 Elektrotechnische Grundlagen

Der Kondensator ist ein Bauelement, das elektrische Ladungen speichert. Er besteht im einfachsten Fall aus zwei metallischen Platten (den Elektroden), die durch eine isolierende Schicht (das Dielektrikum) voneinander getrennt sind (Plattenkondensator, Abbildung 1.3.1). 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. Die isolierenden Eigenschaften des Dielektrikums kennzeichnet man durch die Dielektrizitätskonstante.

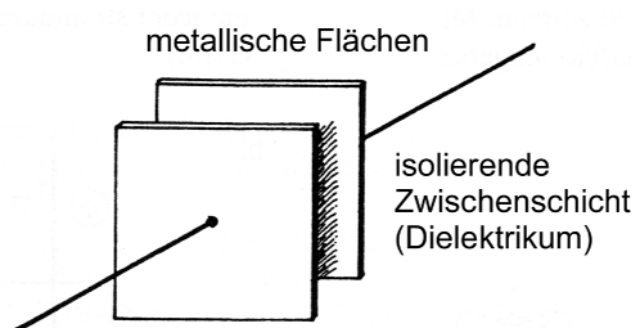


Abbildung 1.3.1 Der Plattenkondensator

Ladungsmenge Q

Die Ladungsmenge wird in der Maßeinheit Coulomb (C) gemessen. Die Ladungsmenge ist das Produkt aus Stromfluß und Zeit:

$$Q = I \cdot t$$

1 C ist die Ladungsmenge, die bei einem Strom von 1 A an einer beliebigen Stelle eines Leiters in 1 s durchfließt:

$$1 \text{ C} = 1 \text{ As (Amperesekunde)}$$

Kapazität C

Die Kapazität wird in Farad (F) gemessen. Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Spannung}} ; C = \frac{Q}{U}$$

$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{As}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}}$$

Ein Kondensator hat eine Kapazität von 1 F, wenn er bei 1 V Spannung eine Ladung von 1 As (1 C) aufnehmen kann. Übliche Kondensatoren haben viel geringere Kapazitäten, so daß man die Einheit meist mit "verkleinernden" Vorsätzen verwendet (μF , nF , pF , fF).

Die Kapazität eines Plattenkondensators

Abbildung 1.3.2 zeigt, wie man die Kapazität eines Plattenkondensators berechnet.

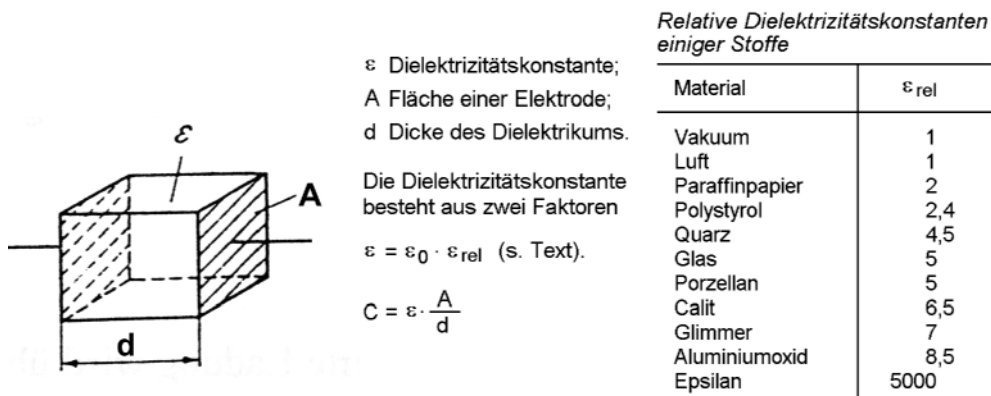


Abbildung 1.3.2 Die Kapazität eines Plattenkondensators

Die Dielektrizitätskonstante

Die Dielektrizitätskonstante (DK) ϵ kennzeichnet die "Güte" des Dielektrikums. Die DK wird üblicherweise dimensionslos (als bloßer Zahlenwert) angegeben (relative Dielektrizitätskonstante, auch mit ϵ_{rel} bezeichnet). Das Vakuum hat definitionsgemäß eine DK = 1. Die DK der Luft entspricht näherungsweise der des Vakuums. Die DK weiterer Stoffe ist aus Abbildung 1.3.2 ersichtlich.

Die absolute Dielektrizitätskonstante (Influenzkonstante)

Die absolute Dielektrizitätskonstante (Influenzkonstante) ϵ_0 (Epsilon-Null) ist eine Naturkonstante:

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} = 8,8542 \cdot 10^{-14} \frac{\text{F}}{\text{cm}}$$

Mit diesem Wert muß die relative Dielektrizitätskonstante multipliziert werden.

Der Kondensator im Wechselstromkreis

Wenn wir einem Kondensator Ladungsträger zuführen, kommt - infolge der Influenzwirkung - zunächst ein Stromfluß zustande. Erst der geladene Kondensator wirkt als Isolator, über dem man eine Spannung messen kann. Wir beobachten also die Reihenfolge: erst Stromfluß, dann Spannung. Man sagt, die Spannung eilt dem Strom nach (negative Phasenverschiebung). Beim idealen Kondensator beträgt die Phasenverschiebung $-\pi/2$ bzw. -90° (Abbildung 1.3.3). Der Blindwiderstand X_C eines (idealen) Kondensators ergibt sich zu:

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

Wir merken uns:

Der Blindwiderstand eines Kondensators *sinkt* mit steigender Frequenz. Mit anderen Worten: Der Kondensator sperrt Gleichstrom und läßt Wechselstrom passieren, und zwar um so besser (= um so weniger abgeschwächt), je höher dessen Frequenz ist.

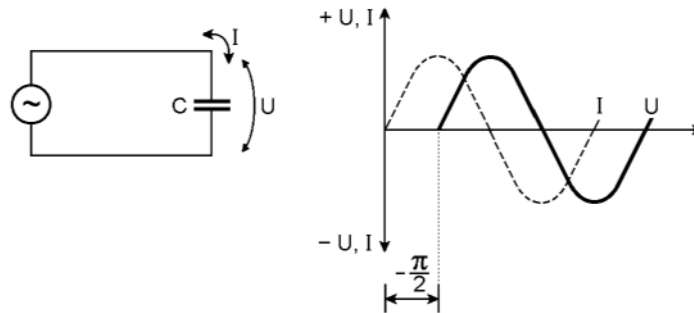


Abbildung 1.3.3 Der Kondensator im Wechselstromkreis

Der Kondensator als Energiespeicher

Ein Kondensator der Kapazität C, an dem die Spannung U anliegt, hat folgenden Energiebetrag E gespeichert:

$$E = \frac{1}{2} C U^2$$

Beispiel: 500 μF , 200 V.

$$E = 0,5 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \text{ As/V} \cdot (200 \text{ V})^2 = 250 \cdot 10^{-6} \cdot 40\,000 \text{ A} \cdot \text{V} \cdot \text{s} = 10\,000\,000 \cdot 10^{-6} \text{ Ws} = 10 \text{ Ws} = 10 \text{ J}$$

Laden und Entladen eines Kondensators über einen Widerstand - die Zeitkonstante

Wird ein Kondensator über einen Widerstand geladen oder entladen (Abbildung 1.3.4), so ergeben sich charakteristische Spannungs- und Stromverläufe (Abbildungen 1.3.5, 1.3.6).

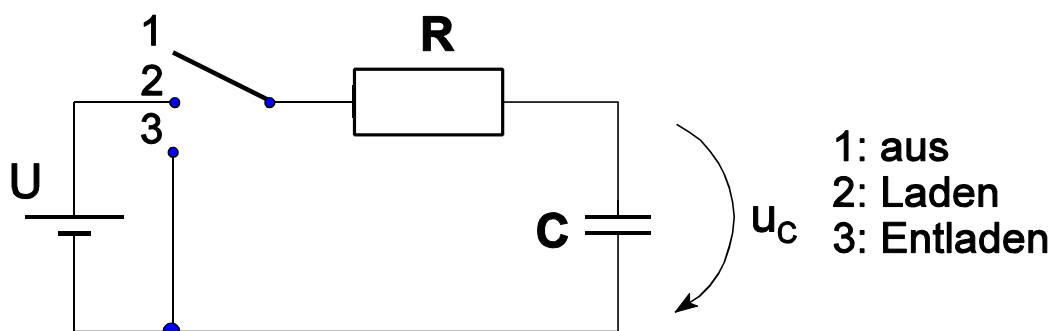


Abbildung 1.3.4 Laden und Entladen eines Kondensators (Prinzipschaltung)

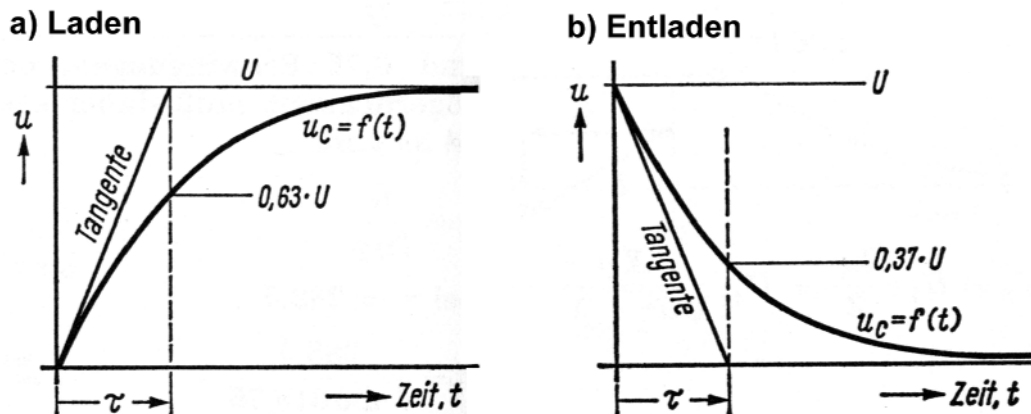


Abbildung 1.3.5 Der Spannungsverlauf beim Laden und Entladen

Laden

Der Kondensator ist entladen ($u_C = 0$). Wir bringen nun den Schalter in Abbildung 1.3.4 in Stellung 2, verbinden also die Reihenschaltung von Widerstand R und Kondensator C mit der Spannungsquelle. Die Spannung u_C über dem Kondensator wird nach einer Exponentialfunktion ansteigen (erst schnell, dann immer langsamer). In der Theorie wird der Endwert ($u_C = U$) erst bei $t = \infty$ erreicht (also nie).

$$u_C = U \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right) = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Die Zeitkonstante

Das Produkt aus Widerstands- und Kapazitätswert entscheidet über den Spannungsanstieg. Es wird deshalb als Zeitkonstante τ bezeichnet:

$$\tau = R \cdot C$$

Typische Zeitpunkte beim Laden:

- nach der Zeit τ ist der Kondensator auf 63% der Ausgangsspannung aufgeladen ($0,63 U$),
- nach der Zeit 2τ ist der Kondensator auf 77% der Ausgangsspannung aufgeladen ($0,77 U$),
- nach der Zeit 4τ ist der Kondensator auf 98% der Ausgangsspannung aufgeladen ($0,98 U$),
- nach der Zeit 7τ weicht die Spannung über dem Kondensator weniger als 100 ppm von U ab.

Die Tangente im Punkt $t = 0$ schneidet die 100%-Linie im Abstand τ .

Entladen (1)

Der Kondensator ist (praktisch) voll geladen ($u_C = U$). Um ihn zu entladen, bringen wir den Schalter in Abbildung 1.3.4 in Stellung 3, bilden also aus Widerstand R und Kondensator C einen geschlossenen Stromkreis. Die Spannung u_C über dem Kondensator wird nach einer Exponentialfunktion abfallen (erst schnell, dann immer langsamer). In der Theorie wird der Endwert ($u_C = 0$) erst bei $t = \infty$ erreicht (also nie).

$$u_C = U e^{-\frac{t}{RC}} = U e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Typische Zeitpunkte beim Entladen:

- nach der Zeit τ ist der Kondensator auf 37% der Ausgangsspannung entladen (0,37 U),
- nach der Zeit 2τ ist der Kondensator auf 23 % der Ausgangsspannung entladen (0,23 U),
- nach der Zeit 4τ ist der Kondensator auf 2% der Ausgangsspannung entladen (0,02 U),
- nach der Zeit 7τ weicht die Spannung über dem Kondensator weniger als 100 ppm von 0 V ab.

Die Tangente im Punkt $t = 0$ schneidet die Nulllinie im Abstand τ .

Entladen (2)

Nach dem Laden des Kondensators bringen wir (vgl. Abbildung 1.3.4) den Schalter wieder in Stellung 1. Der geladene Kondensator hängt also gleichsam in der Luft. In der Theorie bleibt die Ladung erhalten. In der Praxis klingt sie im Laufe der Zeit ab, und zwar nach eine Exponentialfunktion gemäß Abbildung 1.3.5b, wobei sich die Zeitkonstante aus der Kapazität und aus den parasitären Widerständen ergibt.

Der Stromfluß durch den Kondensator

Wenn wir einen Impuls auf einen Kondensator geben, so verhält sich dieser zunächst wie ein *Kurzschluß* (bzw. geringer Widerstand) und wird dann allmählich zum *Isolator* (Abbildung 1.3.6). Wenn wir einem geladenen Kondensator keine Spannung mehr zuführen, so wird er sich langsam entladen (über den Lastwiderstand im Stromweg oder über seinen eigenen parasitären Isolationswiderstand).

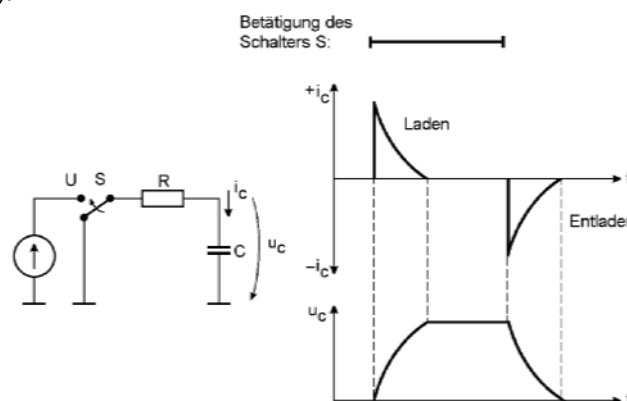


Abbildung 1.3.6 Strom - und Spannungsverläufe beim Laden und Entladen

Laden:

$$i_C = \frac{U - U_C}{R} = \frac{U - U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})}{R} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

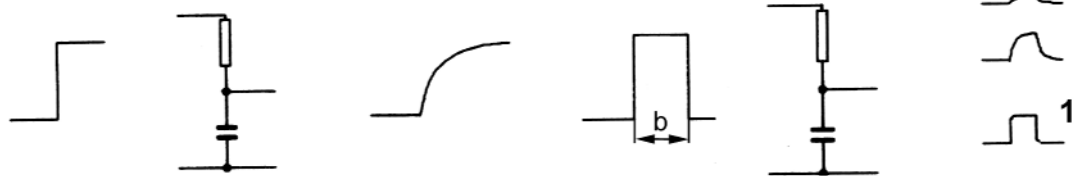
Entladen:

$$i_C = - \frac{U_C}{R} = - \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Zum Verhalten einfacher RC-Glieder

Wir betrachten einfache Reihenschaltungen aus Widerstand und Kondensator (RC-Glieder), die mit Spannungssprüngen und mit Impulsen beaufschlagt werden (Abbildung 1.3.7).

a) Integrierglied, Tiefpaß



b) Differenzierglied, Hochpaß

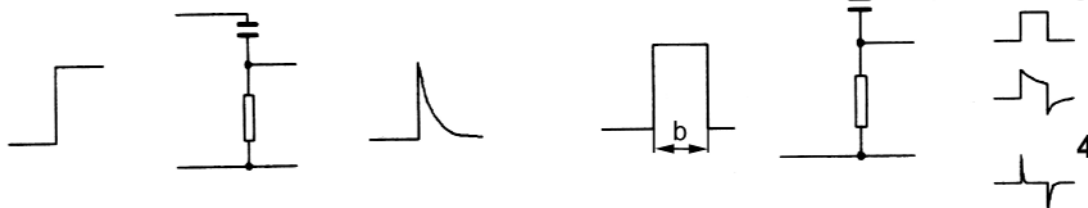


Abbildung 1.3.7 Zum Verhalten einfacher RC-Glieder. Ganz rechts: Impulsformen, die sich bei verschiedenen Verhältnissen von Zeitkonstante τ und Impulsbreite b ergeben. Jeweils oben: $\tau : t$ groß ($\tau \gg b$), jeweils unten: $\tau : t$ klein ($\tau < b$)

Erklärung:

Das Verhalten hängt offensichtlich von der Reihenfolge der Zusammenschaltung ab:

- a) die Ausgangsspannung wird über dem Kondensator abgenommen. Der Spannungsverlauf entspricht Abbildung 1.3.5. Aus einem Spannungssprung wird ein allmähliches Ansteigen bzw. Abfallen. Ist der Impuls viel länger als die Zeitkonstante (1), so wird er nahezu unverfälscht weitergegeben (Tiefpaßverhalten - breite Impulse werden durchgelassen, schmale nicht). Seine Flanken werden dabei gemäß Abbildung 1.3.5 verformt (= verschliffen). Ist der Impuls kürzer als die Zeitkonstante (2), so hat der Kondensator nicht genug Zeit zum vollständigen Laden bzw. Entladen, so daß der Ausgangsimpuls gar nicht mehr bis zum vollen Spannungspegel hochlaufen kann (2). Eine Folge kurzer Impulse führt dazu, daß sich eine Ausgangsspannung im Sinne eines Mittelwertes einstellt (integrierende oder glättende Wirkung (Siebwirkung)).

- b) die Ausgangsspannung wird über dem Widerstand abgenommen. Da der Kondensator anfänglich ungeladen ist, wirkt er zunächst als näherungsweise Kurzschluß. Der fließende Strom bewirkt einen Spannungssprung über dem Widerstand. Dann lädt sich der Kondensator mehr und mehr auf. Dementsprechend vermindert sich die Spannung über dem Widerstand. Ist der Impuls kürzer als die Zeitkonstante (3), so wird der Kondensator so schnell umgeladen, daß er gar keine Zeit hat, irgend etwas zu verändern. Der Impuls wird also nahezu unverfälscht weitergegeben (Hochpaßverhalten - schmale Impulse werden durchgelassen, breite nicht). Ist der Impuls viel länger als die Zeitkonstante (4), so führen beide Flanken zu Nadeln am Ausgang (differenzierende Wirkung).

Hinweis:

Das Laden und Entladen des Kondensators vollzieht sich stets gemäß der jeweiligen Exponentialfunktion. Folgen die eingangsseitigen Spannungsänderungen so schnell aufeinander, daß sich der Kondensator nicht mehr voll auf- oder entladen kann, so ergibt sich die Ausgangsspannung aus der Aneinanderreihung der entsprechenden Funktionsabschnitte (Abbildung 1.3.8).

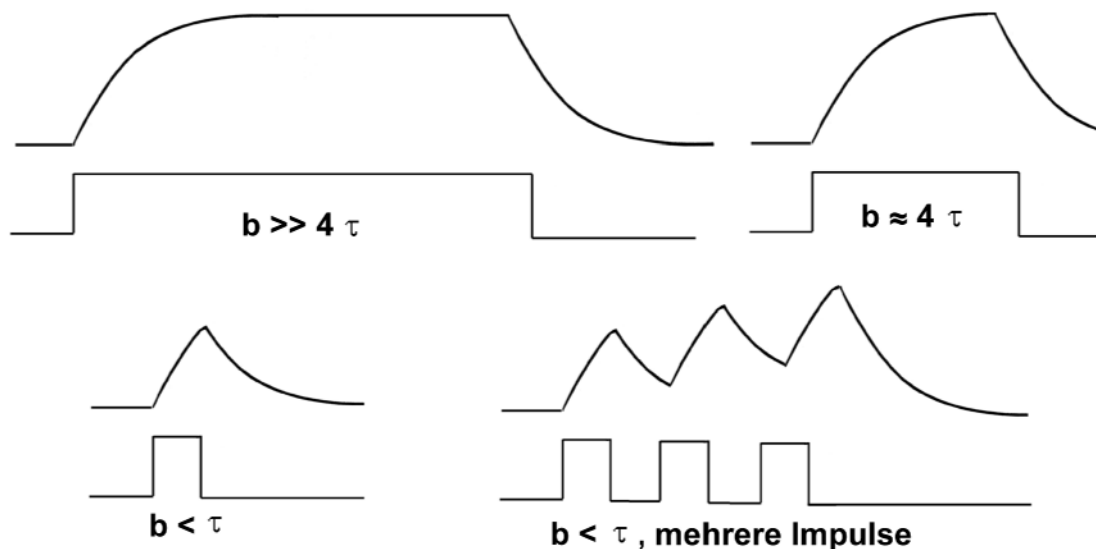


Abbildung 1.3.8 Spannungsänderungen am Kondensator

Anwendungsbeispiel: Impulstrennung im Fernsehempfänger (Abbildung 1.3.9).

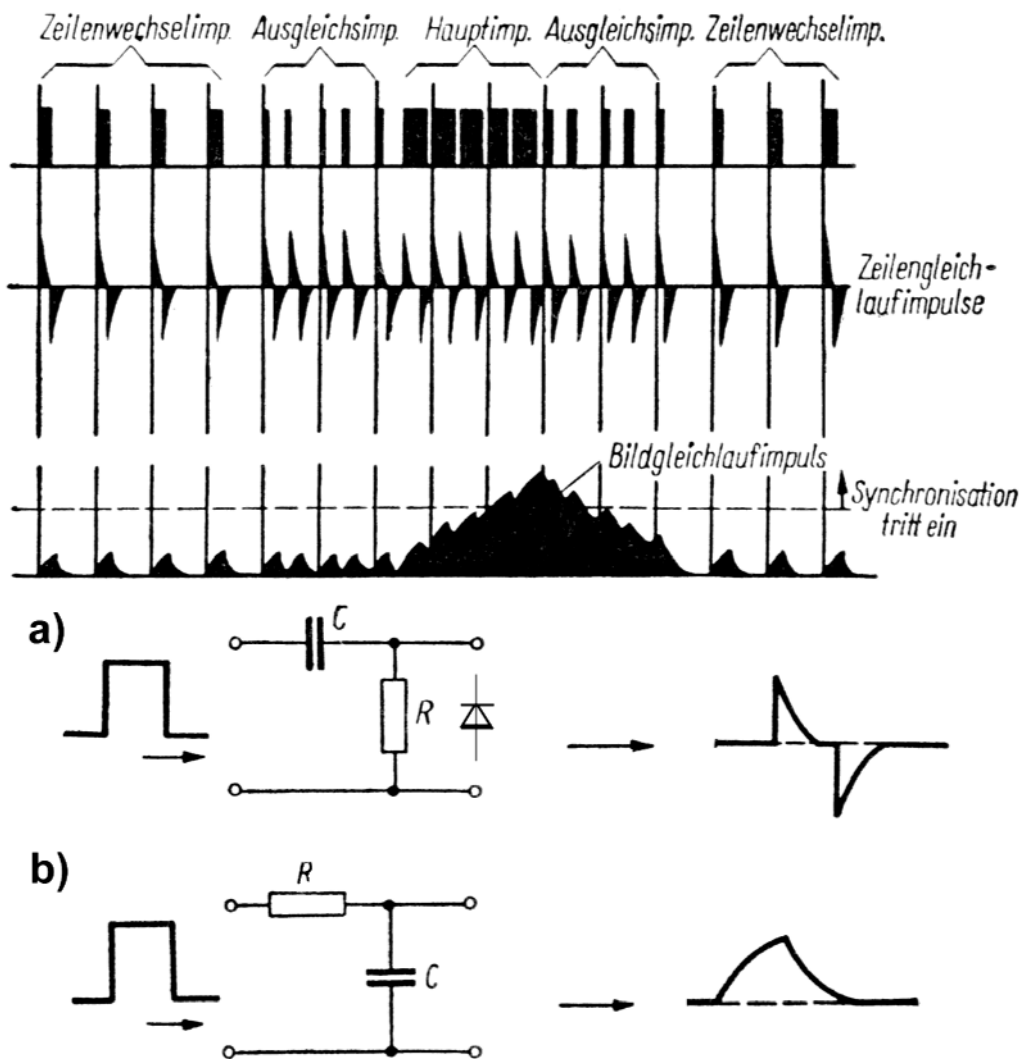


Abbildung 1.3.9 Impulstrennung im Fernsehempfänger

Erklärung:

Zeilensynchronimpulse (HSYNC) haben eine Impulsfolgefrequenz von 15,625 kHz (Zeilendauer = 64 μ s) und eine Breite von (nominell) 256 ns. Bildsynchronimpulse (VSYNC) haben bei gleicher Impulsfolgefrequenz eine Breite von (nominell) 58,24 μ s. Der eigentliche Bildwechselimpuls besteht aus 5 Hauptimpulsen im Abstand von 64 μ s.

- Wirkung des Differenzierglieds: jede Impulsflanke führt zu einer Nadel. Nadeln der jeweils unnützen Polarität können mittels Diode kurzgeschlossen werden.
- Wirkung des Integrierglieds: schmale Impulse führen zu kleine "Wellen" (der Kondensator wird kurze Zeit aufgeladen und hat dann wieder Gelegenheit, sich zu entladen). Die breiten Hauptimpulse hingegen laden den Kondensator soweit auf, daß ein Schwellwert überschritten wird. Das löst den Bildrücklauf aus.

1.3.2 Kennwerte

Kapazitätswert (Nennwert)

Kondensatoren werden in einer Vielzahl genormter, abgestufter Nennwerte gefertigt. Die genormten Nennwerte sind in den E-Reihen nach DIN/IEC vorgegeben. Ist die Kapazität einstellbar, bezeichnet der Nennwert den größten einstellbaren Wert. Nennwertangaben beziehen sich typischerweise auf eine Temperatur von + 20 °C (C_{20}).

Toleranz

Die zulässige Abweichung der Kapazität wird in Prozenten vom Nennwert angegeben. Typische Toleranzbereiche: $\pm 2,5\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$.

Isolationswiderstand

Der Isolationswiderstand ist der ohmsche Widerstand zwischen den beiden Elektroden. Er wird mit steigender Temperatur geringer.

Verlustfaktor

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ (Tangens Delta) ist das Verhältnis vom ohmschen zum kapazitiven Widerstand (bzw. vom Wirk- zum Blindwiderstand) bei einer bestimmten Frequenz. (Der ideale Kondensator wäre ein reiner Blindwiderstand, und der Strom würde der Spannung um 90° vorauslaufen. Jeder reale Kondensator hat aber induktive und ohmsche Widerstandsanteile, so daß sich eine geringere Phasenverschiebung ergibt.) Der Verlustfaktor ist frequenzabhängig. Er wird typischerweise für eine Frequenz von 1 kHz bei 20 °C angegeben (s. Abschnitt 1.3.3).

Angaben zur Spannungsfestigkeit

Der auf dem Bauelement angegebene Spannungswert ist die *Nennspannung* (genauer: die Nenngleichspannung). Typische Spannungswerte sind: 25 V, 63 V, 160 V, 250 V, 630 V. Abhängig von der Ausführungsform sind zusätzliche Spannungsangaben von Bedeutung. (s. weiter unten).

Eine zu hohe Spannung kann bewirken, daß der Kondensator durchschlägt, daß also das Dielektrikum wenigstens teilweise zerstört wird (das Bauelement wird dadurch entweder zur Lötstelle oder zu einem Kondensator mit unvorhersagbar geringerer Kapazität). Hinreichende Sicherheitszuschläge beim Schaltungsentwurf wirken sich günstig auf die Zuverlässigkeit aus. (Dem steht in kritischen Fällen entgegen, daß spannungsfestere Kondensatoren größer sind. Und das bedeutet nicht nur mehr Platz und höhere Kosten, sondern auch erhöhte Induktivität durch längere Zuleitungen.)

Achten Sie darauf, ob am Kondensator kurzzeitige Spitzenspannungen anliegen (wie sie z. B. beim Abschalten von Induktivitäten entstehen). Es gibt Bauelemente, für die zulässige kurzzeitige Spitzenspannungen bei nichtperiodischen Schaltvorgängen ausdrücklich spezifiziert sind.

Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient (Temperaturbeiwert) α kennzeichnet die Abhängigkeit des Kapazitätswertes von der Gehäusetemperatur. Er wird üblicherweise in $\%/^{\circ}\text{C}$ oder in $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ angegeben. Ein gängiger Wert ist beispielsweise $200 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$.

Temperaturkompensation

Der Kondensator verhält sich komplementär zum Widerstand: der Reihenschaltung zweier Widerstände entspricht die Parallelschaltung zweier Kondensatoren und umgekehrt. Ist α wirklich temperaturunabhängig, wäre die Parallelschaltung zu bevorzugen. Bei Reihenschaltung mit Temperaturkoeffizient β und reziproker Kapazität ($1/C$) rechnen. Formeln sehen genauso aus wie in Abschnitt 1.2 (statt R setze C).

1.3.3 Ersatzschaltungen

Die Ersatzschaltung wird wesentlich von der technologischen Ausführung des Kondensators bestimmt. Es gibt ungepolte und gepolte Kondensatoren. Bei letzteren ist es nicht gleichgültig, welcher der beiden Anschlüsse auf welchem Potential liegt. *Elektrolytkondensatoren* sind gepolt, die anderen Typen ungepolt. Abbildung 1.3.10 zeigt Ersatzschaltungen eines ungepolteten und eines Elektrolytkondensators. Weiterhin sind dort Näherungsformeln zum Verlustfaktor angegeben.

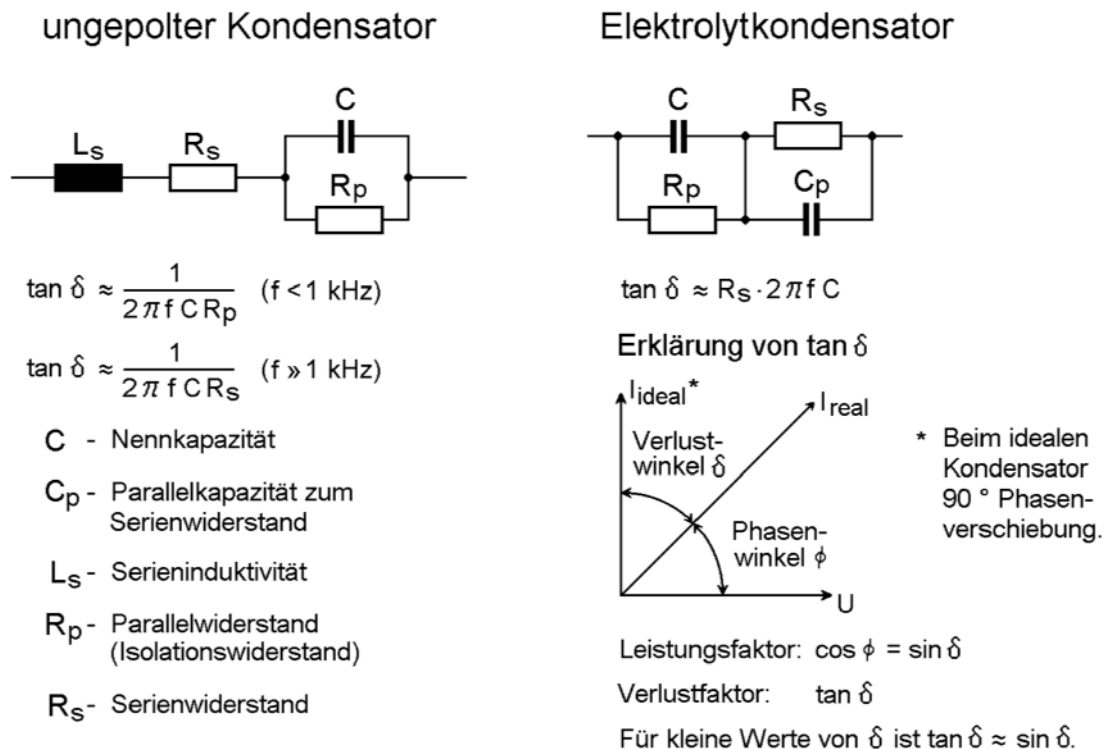


Abbildung 1.3.10 Ersatzschaltungen für Kondensatoren

Der effektive Scheinwiderstand (Impedanz)

Der effektive Scheinwiderstand Z gibt darüber Auskunft, wie gut der Kondensator höherfrequente Wechselströme durchleiten kann. Typische Meßbedingungen: 10 kHz bei 20 °C (von 1000 μF an aufwärts auch 1 kHz). Abbildung 1.3.10 veranschaulicht die Abhängigkeit des Scheinwiderstands von der Frequenz.

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Der Ersatzserienwiderstand (Equivalent Series Resistance ESR)

Der Ersatzserienwiderstand R_{ESR} ist der effektive ohmsche Widerstand zwischen den Anschlüssen des Kondensators. Der Kennwert gibt Auskunft darüber, wie gut der Kondensator niederfrequente Wechselströme durchleiten kann.

$$R_{\text{ESR}} = \frac{\tan \delta}{\omega C}$$

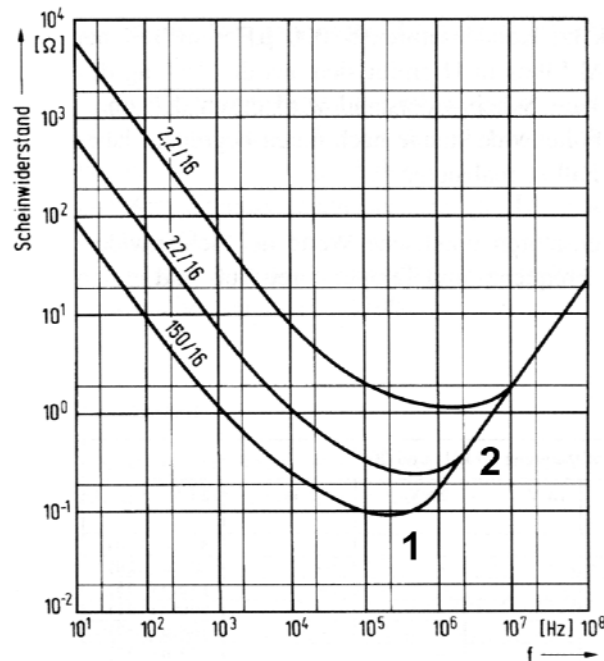


Abbildung 1.3.11 Der Scheinwiderstand in Abhängigkeit von der Frequenz (am Beispiel von drei verschiedenen Kondensatoren)

Erklärung:

1 - bei etwa 10 kHz erreicht der Scheinwiderstand sein Minimum (hier: etwa 1 Ω ... 100 m Ω); 2 - bei höheren Frequenzen macht sich der induktive Widerstand (L_S) zunehmend bemerkbar.

1.3.4 Der Kondensator im Schaltplan

In Abbildung 1.3.12 sind die üblichen Schaltsymbole für Kondensatoren zusammengestellt.

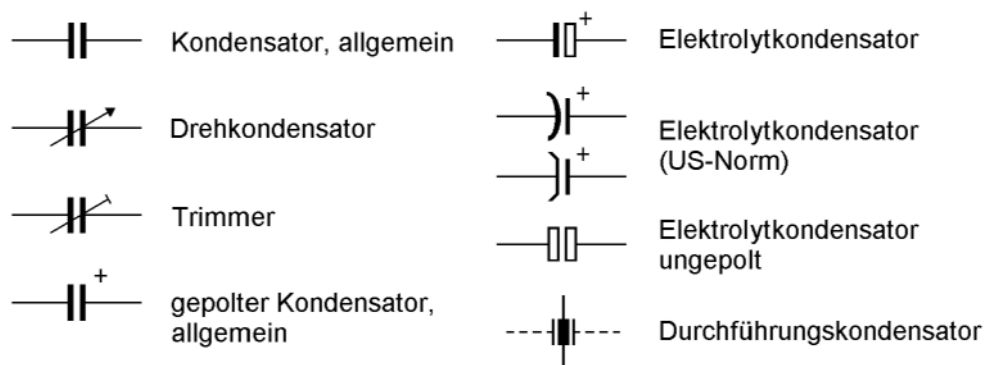


Abbildung 1.3.12 Schaltsymbole für Kondensatoren

1.3.5 Folienkondensatoren

Im Folienkondensator wird eine Kunststoff-Folie als Dielektrikum verwendet. Die beiden Elektroden ("Platten") des Kondensators werden durch Metallfolien oder durch beidseitig aufgedampfte Metallschichten gebildet. Die gesamte Folien-Anordnung wird als kompakter Wickel im Gehäuse untergebracht. Typische Kapazitäten liegen im Bereich von 1 nF... 1µF (extreme Werte: 50 pF...>20 µF). Die Eigenschaften des Kondensators werden maßgeblich vom Folienmaterial bestimmt (Tabelle 1.3.1).

Folienmaterial	mVorteile	Nachteile	Kapazitätsbereich (Richtwerte)	Einsatz
Polyester	geringe Abmessungen, kostengünstig		1 nF...4,7 µF	allgemeine Anwendungen (als Stützkondensatoren in Logikschaltungen ungeeignet, auch in Tropfen-Bauform)
Polystyrol (Styroflex)	hoher Isolationswiderstand, kleine Abmessungen	zulässige Betriebstemperatur geringer als bei Polyester und Polycarbonat	50 pF...10 nF	in Analogschaltungen
Polycarbonat	Temperaturgang und Isolationswiderstand besser als bei Polyester	weniger geeignet für Dauerbetrieb mit Wechselspannung	100 pF...100 nF	zeitbestimmende Kondensatoren und andere Anwendungen, wo es auf geringe Parameteränderungen ankommt
Polypropylen	geringe Verluste bei höheren Frequenzen, geeignet für Dauerbetrieb mit hohen Wechselspannungen	teuer	100 pF...220 nF (Miniaturausführungen); Motorkondensatoren 2...22 µF	Motorkondensatoren, zeitbestimmende Kondensatoren

Tabelle 1.3.1 Folienmaterial für Kondensatoren

1.3.6 Metallpapierkondensatoren

Metallpapierkondensatoren (MP-Kondensatoren) sind Folienkondensatoren, die eine imprägnierte Papierschicht als Dielektrikum haben. Dieses ist beidseitig mit einer Metallschicht bedampft. Solche Kondensatoren sind für den Betrieb an Netzwechselspannung vorgesehen. Typische Kapazitäten liegen zwischen 2,2 und 220 nF.

Selbstheilung

Das ist eine typische Eigenschaft des MP-Kondensators, aber auch verschiedener anderer Folientypen: schlägt der Kondensator durch, so verdampft Metall, und die Folie wird durchlöchert. Um das Loch in der Folie dampft das Metall aber in einem gewissen Umkreis ab (das Loch im Dielektrikum ist kleiner), so daß kein Schluß zwischen beiden Elektroden entsteht (nur vermindert sich die Kapazität geringfügig).

1.3.7 Keramische Kondensatoren

Keramische Werkstoffe als Dielektrikum ermöglichen induktivitätsarme Bauformen, die für Hochfrequenzanwendungen gut geeignet sind. Es gibt zwei grundsätzlich unterschiedliche Auslegungen:

- mit Werkstoffen, die eine vergleichsweise geringe Dielektrizitätskonstante haben, werden kleinere Kapazitätswerte verwirklicht (Größenordnung: von 2,2 bis 330 pF). Diese werden mit geringen Toleranzen eingehalten; Temperaturkoeffizient und Verluste sind gering. Anwendung: frequenzbestimmende Kondensatoren in Hochfrequenzschaltungen.
- mit Werkstoffen vergleichsweise höherer Dielektrizitätskonstante werden Kapazitäten zwischen etwa 1 nF und 1 μ F bei geringen Abmessungen realisiert, allerdings mit höheren Toleranzen, größerem Temperaturkoeffizienten und höheren Verlusten. Anwendung: Stütz-, Entkopplungs- und Durchführungskondensatoren.

Es kommt auf jeden mm an: besonders induktivitätsarme Bauformen

1 mm Anschlußdraht hat, rund gerechnet, eine Induktivität von 1 nH. Und das kann gelegentlich kritisch sein. (Und zwar nicht nur bei "richtiger" Hochfrequenz, sondern auch dann, wenn über Speisespannungszuführungen kräftige Stromstöße fließen - wenn beispielsweise in einem "breiten" Bustreiber 18 oder gar 36 Ausgänge auf einmal schalten, wobei jeder Ausgang für 30...60 mA spezifiziert ist.) Abbildung 1.3.13 veranschaulicht eine besonders induktivitätsarme Bauform.

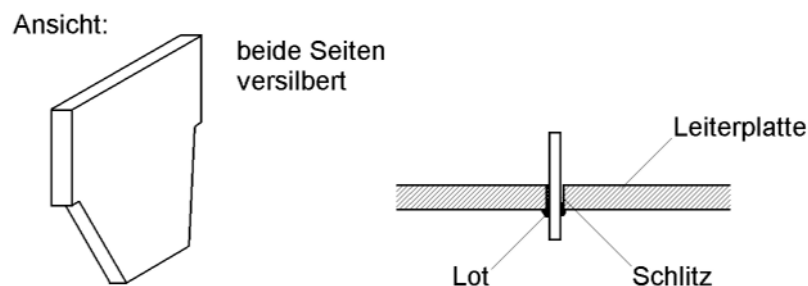


Abbildung 1.3.13 Keramik-Kondensator in Trapezform, der in einen Schlitz in der Leiterplatte eingelötet wird (für HF-Anwendungen)

Bei den Stützkondensatoren in Digitalschaltungen finden wir zudem noch folgende Lösungen:

- Schaltkreisfassungen mit eingebautem Stützkondensator,
- Schaltkreisgehäuse mit eingebauten Stützkondensatoren (vgl. die Prozessoren der PCs),
- SMD-Stützkondensatoren auf der anderen Seite der Leiterplatte (unterhalb des Digitalschaltkreises),
- SMD-Stützkondensatoren in besonders flacher Bauform unter dem Digitalschaltkreis.

Durchführungskondensatoren

Durchführungskondensatoren dienen dazu, beim Durchtritt von Versorgungsspannungs- und Steuerleitungen durch abschirmende Gehäuse die Hochfrequenz "drin zu halten", also in die Gehäusewand abzuleiten. Sie werden als metallisierte Keramikröhrchen (zum Einlöten) oder in Metallgehäusen mit Schraubgewinde gefertigt (Größenordnung der Kapazität: 47 pF...22 nF). In ähnlichen Bauformen werden komplette Entstörfilter angeboten (Abbildung 1.3.14).

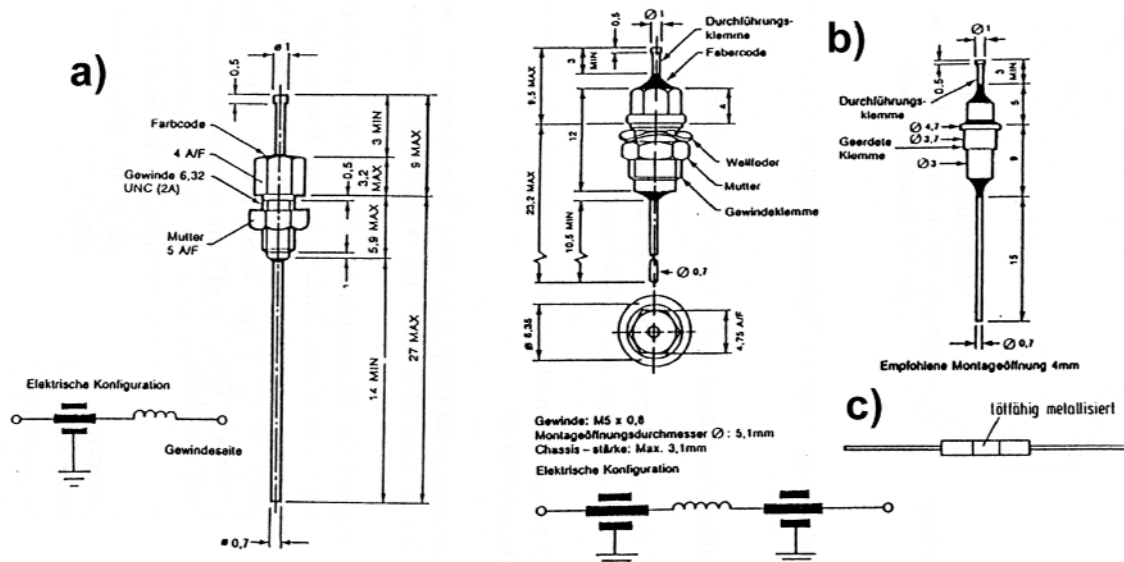


Abbildung 1.3.14 Durchführungskondensatoren und Entstörfilter (RS Components). (a) LC-Glied; b) Pi-Filter; c) Durchführungskondensator in Keramikröhrchen. Größere Durchführungskondensatoren haben Bauformen ähnlich a) und b)

1.3.8 Einstellbare Kondensatoren (Trimmer)

Trimmkondensatoren werden nur mit kleinen Kapazitätswerten (Größenordnung 1...100 pF) gefertigt (Dielektrika: Luft, Folie oder Keramik). "Mehrgängige" Ausführungen gibt es nicht; der Stellbereich beträgt nur eine Umdrehung (360°). Also vorsichtig verstellen.

Praxistip:

Wenn man überhaupt noch an Trimmern herumschrauben muß, hat es bestimmt irgend etwas mit Hochfrequenz zu tun. Der Schraubenzieher verändert die Kapazität, sobald er angesetzt wird. Zum professionellen Abgleichen braucht man ein sog. Abgleichbesteck mit passenden Schraubenziehern aus Kunststoff oder Keramik.

1.3.9 Elektrolytkondensatoren (Elkos)

Der Elektrolytkondensator hat nur eine metallische Elektrode. Die andere wird durch einen Elektrolyten gebildet. Das Dielektrikum besteht in einer äußerst dünnen Oxidschicht auf der Metall-Elektrode. Diese Bauweise erlaubt es, auch extreme Kapazitätswerte (einige 1000 μF ...> 1 F) zu verwirklichen, hat aber zur Folge, daß man grundsätzlich einen *gepolten* Kondensator erhält. (Die Metall-Elektrode muß positiver sein als der Elektrolyt.)

Wir merken uns: beim Einbauen eines Elko unbedingt auf die Polung achten (sonst kann's wirklich knallen und stinken).

Es gibt Aluminium- und Tantal-Elektrolytkondensatoren. Letztere haben deutlich bessere Kennwerte bei geringeren Abmessungen, sind aber auch deutlich teurer.

Elektrolytkondensatoren werden als Sieb-, Glättungs- und Stützkondensatoren eingesetzt. Sie dürfen nicht mit Wechselstrom betrieben werden.

Nenngleichspannung und Spitzenspannung

Nach IEC werden Elkos für folgende Nennspannungen angeboten: 3 V, 6,3 V, 10 V, 16 V, 25 V, 35 V, 50 V, 63 V, 100 V, 160 V, 250 V, 350 V, 450 V. Kurzzeitig (z. B. beim Einschalten) darf eine höhere Spannung (Spitzenspannung) anliegen (bis zu 100 V Nennspannung das 1,15-fache der Nennspannung; darüber das 1,1-fache; bei Tantalkondensatoren beträgt die Spitzenspannung typischerweise das 1,3-fache der Nennspannung).

Überlagerte Wechselspannung

Der am Elko anliegenden Gleichspannung darf eine Wechselspannung überlagert sein. (Höchstwert: bis 10% der Nenngleichspannung; bei über 100 Hz weniger.) In der "richtigen" Polarität darf die Summe aus Gleichspannung und Scheitelwert der Wechselspannung den Wert der Nenngleichspannung nicht überschreiten; eine mit "falscher" (umgekehrter) Polarität anliegende Spannung darf 1...2 V keineswegs überschreiten (Umpolspannung).

Ungepolte Elkos

Man kann Elkos auch für reinen Wechselspannungsbetrieb verwenden, wenn man zwei (mit gleichen Kennwerten) gegeneinander in Reihe schaltet (Abbildung 1.3.15). Ungepolte Elkos als fertige Bauelemente (bipolare oder NF-Elkos) beruhen auf demselben Prinzip (einer Anordnung Metallelektrode-Oxidschicht-Elektrolyt-Oxidschicht-Metallelektrode).

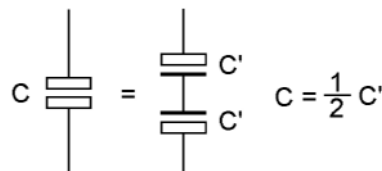


Abbildung 1.3.15 Elektrolytkondensatoren für Wechselspannungsbetrieb

Leck- bzw. Reststrom

Während der Stromfluß bei anliegender Gleichspannung durch einen ungepolten Kondensator vernachlässigbar gering ist, fließen durch Elektrolytkondensatoren durchaus nennenswerte Leck- bzw. Restströme. Der Leckstrom ist beim Einschalten zunächst höher (bis zu einigen 100 µA) und geht dann mit der Zeit auf einen *Betriebsleckstrom* von einigen µA zurück.

Faustformel:

$$I_R = 0,5 \cdot C \cdot U$$

- I_R : höchstzulässiger Reststrom (in µA),
- C: Kapazität in (µF),
- U: Nenn- bzw. Betriebsspannung in V.

Formieren

Längere Lagerung von Aluminium-Elkos kann die Oxidschicht angreifen. Die Folge: Bei der ersten Inbetriebnahme ist mit extremen Leckströmen zu rechnen. "Formieren" bedeutet, einen länger gelagerten Kondensator zunächst außerhalb der Schaltung "an Spannung zu gewöhnen" (z. B. 1 Stunde über einen Vorwiderstand zwischen 100 Ω und 1 kΩ mit seiner Nennspannung zu belegen). Moderne Typen können wenigstens 2 Jahre gelagert werden, ohne daß eine solche Prozedur nötig ist.

1.3.10 Energiespeicherkondensatoren

Energiespeicherkondensatoren (Doppelschichtkondensatoren; Warennamen: Gold Caps, Supercaps) sind Elektrolytkondensatoren, deren Elektroden aus Aktivkohle bestehen. Jedes Aktivkohleteilchen ist praktisch ein eigener kleiner Kondensator. So können extreme Kapazitäten (0,1 F...1 F und mehr; die Obergrenze liegt - Stand der Technik - bei etwa 70 F) auf kleinem Raum verwirklicht werden. Abbildung 1.3.16 gibt einen Einblick in Aufbau und Wirkungsweise, Abbildung 1.3.17 veranschaulicht das Verhalten in der Schaltung, Abbildung 1.3.18 zeigt ein Praxisbeispiel.

Spannungsfestigkeit

Die Spannungsfestigkeit wird durch die *Zersetzungsspannung* bestimmt. Unterhalb der Zersetzungsspannung wirkt der Kondensator als Isolator. Wird die Zersetzungsspannung überschritten, so fließt ein Strom, und der Kondensator beginnt sich zu zersetzen. In den Katalogen finden Sie aber meist nur Angaben zur Nennspannung (die um einen gewissen Sicherheitsbetrag unterhalb der Zersetzungsspannung liegt). Typische Werte: Nennspannung 5,5 V, Zersetzungsspannung > 6,5 V. In der Praxis heißt das: Ladespannung unbedingt kontrollieren.

Laden

Ein Überladen ist nicht möglich. Zum Laden reicht deshalb eine einfache Strombegrenzung. Im Kondensator selbst wirken der Ladewiderstand (vgl. Abbildung 1.3.16d) sowie der Widerstand des Ionentransports strombegrenzend.

Hinweis:

Energiespeicherkondensatoren eignen sich *nicht* als Siebkondensatoren in Stromversorgungen. Dafür ist ihr Ersatzserienwiderstand (ESR) zu hoch.

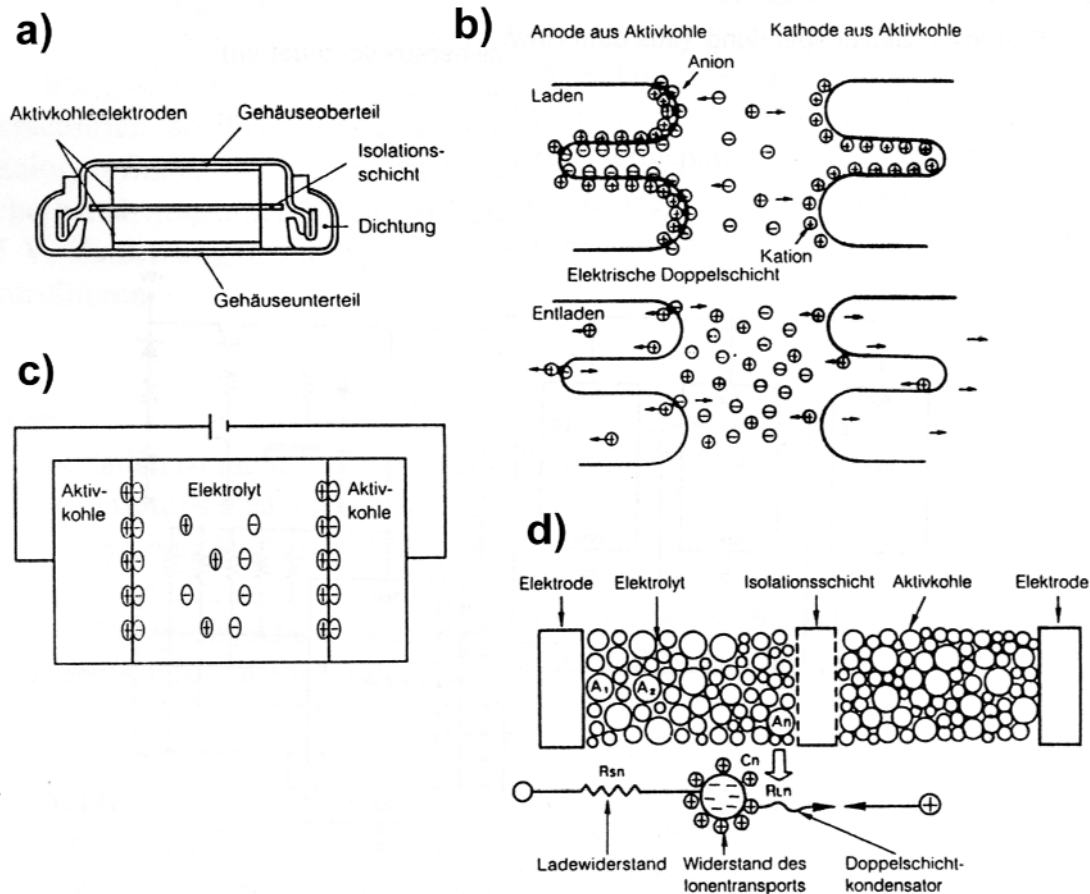


Abbildung 1.3.16 Energiespeicherkondensatoren. a) konstruktiver, b) schematischer Aufbau, c) Laden und Entladen, d) Ersatzschaltung beim Ladevorgang (Panasonic)

Speicherzeit (Entladedauer)

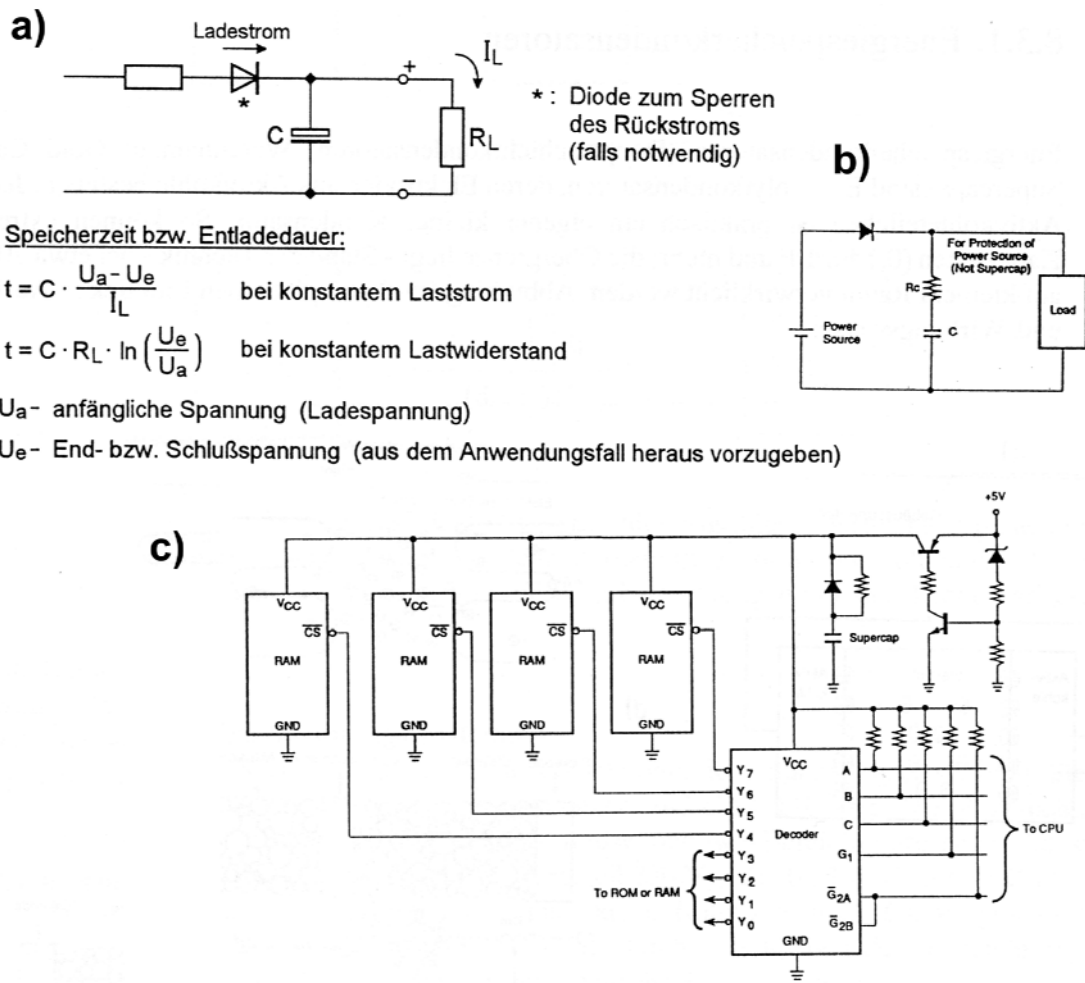
Aus Abbildung 1.3.17a ist ersichtlich, wie man die Speicherzeit für verschiedene Arten der Belastung (konstanter Laststrom oder konstanter Lastwiderstand) bestimmen kann. In der Praxis liegen die Speicherzeiten im Bereich von wenigen Minuten bis zu etwa 1 Woche.

Lebensdauer

Die Hersteller geben Lebensdauern im Bereich von 7...10 Jahren an, wobei das Bauelement mehrere hunderttausend Lade-Entlade-Zyklen übersteht. Energiespeicherkondensatoren sind kurzschlußfest. - Aber trotzdem Vorsicht beim Entladen!

Ultrakondensatoren

Als Ultrakondensatoren bezeichnet man Energiespeicherkondensatoren mit besonders hoher Kapazität (Beispiel 600 F; Nennspannung 3 V). Durch Reihen- und Parallelschaltung können Energiespeichermoduln für höhere Ströme bzw. Spannungen aufgebaut werden. Einsatz vor allem als Puffer für stoßartig aufzubringende Energie.



Speicherzeit bzw. Entladedauer:

$$t = C \cdot \frac{U_a - U_e}{I_L} \quad \text{bei konstantem Laststrom}$$

$$t = C \cdot R_L \cdot \ln\left(\frac{U_e}{U_a}\right) \quad \text{bei konstantem Lastwiderstand}$$

U_a - anfängliche Spannung (Ladespannung)

U_e - End- bzw. Schlußspannung (aus dem Anwendungsfall heraus vorzugeben)

Abbildung 1.3.17 Energiespeicherkondensator in Anwendungsschaltungen (NEC)

Erklärung:

- die konkrete Beschaltung hängt von den jeweiligen Einsatzbedingungen ab. Die Speicherzeit kann man mit den angegebenen Formeln näherungsweise berechnen.
- eine weitere Grundschaltung. Beachten Sie, daß der Serienwiderstand nicht den Kondensator schützt (dieser ist - siehe weiter unten - kurzschlußfest), sondern den Rest der Schaltung.
- die Abbildung zeigt den Einsatz eines Energiespeicherkondensators zur Spannungsstützung einer Speicheranordnung aus CMOS-RAMs. Die Transistorschaltung rechts ist ein Low-Drop-Spannungsregler.

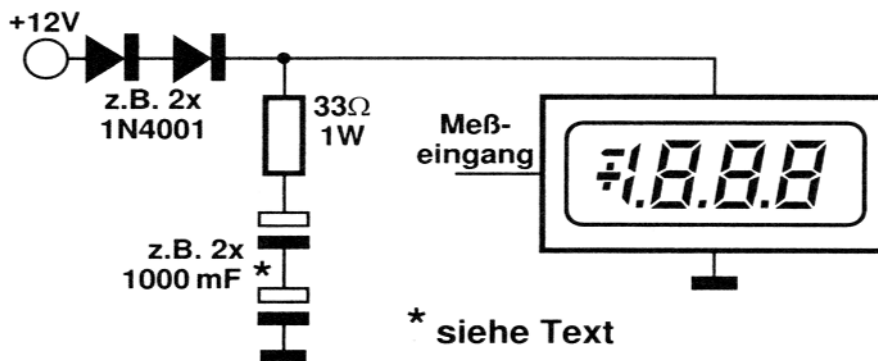


Abbildung 1.3.18 Spannungsversorgung eines Digitalinstruments über Speicherkondensatoren

Speicherzeit:

$$t = C \frac{U_a - U_e}{I_L}$$

- U_a : Anfangsspannung (≈ 11 V),
- U_e : Endspannung (= Mindest-Betriebsspannung: 7 V),
- I_L : Laststrom (3,5 mA).

Mit den 0,5 mF der dargestellten Reihenschaltung ergeben sich ≈ 570 s ≈ 10 min.

Aufladezeit:

$$t_L \approx 4 RC$$

R = Vorwiderstand + ESR der Kondensator-Anordnung. Richtwert für t_L : 3...6 min.

Hinweise:

1. Der wichtigste Kennwert der Dimensionierung ist die *Zersetzungsspannung* der Speicherkondensatoren. Typisch: Nennspannung = 5,5 V, Zersetzungsspannung $> 6,5$ V. Das heißt, über dem Kondensator sollten maximal 5,5...6 V anstehen. Bei 12 V Versorgungsspannung erzwingt dies eine Reihenschaltung zweier Kondensatoren. Im Interesse der Sicherheit sind 2 Dioden*) hintereinandergeschaltet (so daß die Flußspannung - um 0,7 V - zweimal abfällt).
2. Die Kondensatoren sind kurzschlußfest. Ein Überladen ist nicht möglich. Der in Reihe geschaltete Strombegrenzungswiderstand schützt nicht die Kondensatoren, sondern den Versorgungs-Stromweg.
3. Typische Werte für 3 1/2-stellige LCD-Panelmeter: Mindest-Betriebsspannung 7 V, Strombedarf 1...3,5 mA.
4. Für längere Speicherzeiten kann man auch Reihen-Parallel-Schaltungen von Speicherkondensatoren vorsehen (eine Anordnung aus $4 \cdot 1$ F (= 2 Reihenschaltungen parallel) ergibt Speicherzeiten um 20 Minuten).

5. Auf die Ladezeiten achten. Es dauert einige Minuten, bis die Kondensatoren voll geladen sind.
 6. Grundsätzlich aufpassen, wenn (unabhängig von der Art der Versorgung) die Versorgungsspannung unter den Mindestwert sinkt: manche Panelmeter messen dann Mist (anstatt eine entsprechende Warnung - LO BAT - anzuzeigen). Das betrifft sinngemäß jede andere zu versorgende Schaltung, sofern deren Funktion von Grenzen der Versorgungsspannung abhängt und der Ausfall nicht offensichtlich ist.
- *) : *eine* Diode ist unbedingt erforderlich (Rückstromsperre).