

2.4 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, extreme Kapazitätswerte (einige 1000 μF ...> 1 F) zu verwirklichen, hat aber zur Folge, daß man grundsätzlich einen gepolten Kondensator erhält. Die Metall-Elektrode muß auf positiverem Potential liegen als der Elektrolyt. Elektrolytkondensatoren werden als Sieb-, Glättungs- und Stützkondensatoren eingesetzt. Sie dürfen nicht mit Wechselstrom betrieben werden. jElektrolytkondensatoren unterscheiden sich nach der Art der metallischen Elektrode (Aluminium, Tantal oder Niob) und nach der Beschaffenheit des Elektrolyten (feucht oder trocken).

Aluminium mit feuchtem Elektrolyten

Die positive Elektrode ist eine Aluminiumfolie, der Elektrolyt eine dünne Schicht aus Aluminiumoxid. Um die Fläche zu vergrößern, wird die mit Aluminiumoxid bedeckte Seite der Elektrode aufgeraut. Die negative Elektrode ist eine mit dem Elektrolyten getränkte Papierlage, die über eine weitere Aluminiumfolie kontaktiert wird.

Aluminium mit trockenem Elektrolyten

Der Aufbau entspricht Abb. 2.23, nur enthält die Zwischenlage keinen feuchten Elektrolyten, sondern einen organischen Halbleiterwerkstoff (Conductive Polymer). Solche Bauelemente haben einen niedrigen Ersatzserienwiderstand und vertragen bis zu 10 % der Nennspannung mit umgekehrter Polarität (Umpolspannung).

Tantal

Die positive Elektrode ist ein poröser Sinterkörper aus Tantal, der mit einer Tantalpentoxidschicht als Dielektrikum bedeckt ist.

Tantal mit feuchtem Elektrolyten

Der Sinterkörper befindet sich in einem Metallgehäuse aus Silber oder Tantal, das den Elektrolyten enthält. Solche Bauelemente weisen einen sehr geringen Leckstrom auf.

Tantal mit trockenem Elektrolyten

Der zweite Belag besteht aus Mangandioxid, das auf das Tantalpentoxid-Dielektrikum aufgebracht ist. Es wird über weitere Schichten aus Graphit und Silber kontaktiert. Solche Bauelemente sind klein und kostengünstig. Sie vertragen bis zu 10 % der Nennspannung mit umgekehrter Polarität (Umpolspannung) und können auch mit reiner Wechselspannung betrieben werden (< 15 % Nennspannung).

Niob

Dieses Element folgt im Periodensystem dem Tantal nach. Es kommt in größeren Mengen vor und ist kostengünstiger. Bis zur Nutzbarkeit als Kondensatorwerkstoff waren jedoch viele Probleme zu lösen. Das Dielektrikum ist Niobpentoxid. Die positive Elektrode besteht

entweder aus metallischem Niob oder aus Nioboxid-Keramik. Nioboxid-Keramik (NiO) hat eine höhere spezifische Wärme als Niob oder Tantal, so daß entsprechende Bauelemente bei gleichem Volumen höher belastet werden können. Das Anwendungsgebiet entspricht dem der Aluminiumtypen. Sie sind jedoch in einem viel größeren Temperaturbereich einsetzbar (von -55 bis +125 °C ohne wesentliche Kennwertänderung), und sie erreichen eine sehr hohe Lebensdauer (200 000 bis 500 000 Stunden). Die Betriebsgleichspannung darf bis zu 80 % der Nennspannung betragen.

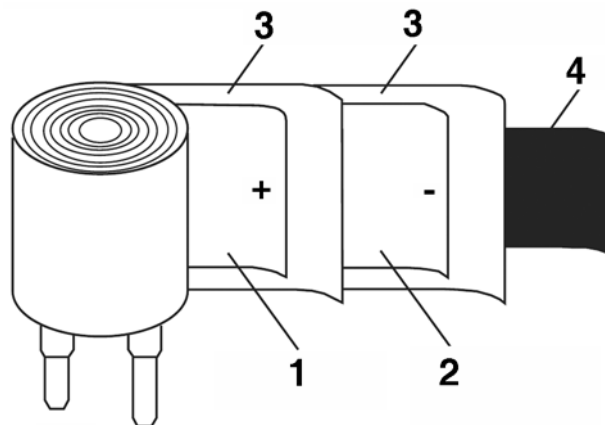


Abb. 2.23 Der Aluminium-Elektrolytkondensator. Der prinzipielle Aufbau (nach [2.8]). 1 - Aluminiumfolie Pluspol (Anode); 2 - Aluminiumfolie Minuspol (Katode); 3 - Papierzwischenlagen; 4 - Klebeband (hält den Wickel zusammen).

Aluminiumtypen mit feuchtem Elektrolyten sind Billigtypen

Sie kosten nicht viel, aber alle Parameter ändern sich in Abhängigkeit von Temperatur, Spannung und Alter sowie von der Frequenz des überlagerten Wechselstroms. Leckstrom (DCL), Ersatzserienwiderstand (ESR) und Ersatzserieninduktivität (ESL) sind hoch, die Lebensdauer ist vergleichsweise gering (die Hersteller nennen typischerweise einige tausend Stunden). Aluminiumelkos sind im Grunde nur als Siebkondensatoren in herkömmlichen Stromversorgungsschaltungen und als Koppelkondensatoren für Niederfrequenz (Audiobereich) einsetzbar.

Solche Bauelemente leben nicht ewig

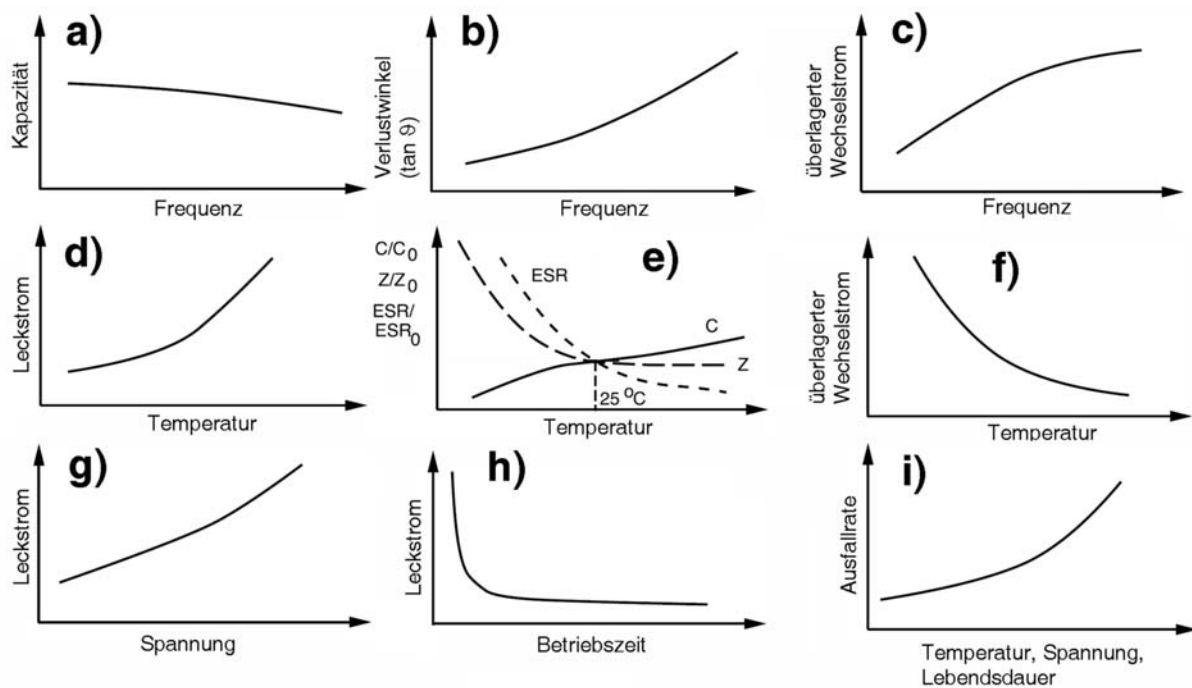
Der wichtigste Fehlermechanismus: das Entweichen des Elektrolyten. Billige Elektronik stirbt nicht selten an ausgetrockneten Stütz- und Siebkondensatoren. Abhilfe: nicht zu sehr belasten:

- nicht zu warm,
- Betriebsgleichspannung nicht zu hoch,
- überlagerter Wechselstrom nicht zu hoch.

Die Hersteller halten Nomogramme und Rechensoftware bereit, mit denen die Lebensdauer in Abhängigkeit von den genannten Parametern berechnet werden kann. Die Lebensdauerangaben im Datenblatt betreffen den Betrieb an der oberen Grenztemperatur.

Faustregeln:

- 10 °C Absenkung der Umgebungstemperatur ergibt Verdopplung der Lebenszeit.
- Bei Betriebstemperaturen von 40 °C an aufwärts ist mit Austrocknen zu rechnen.



Je höher die Frequenz der überlagerten Wechselspannung, desto

- geringer die Kapazität (a),
- größer der Verlustwinkel (b),
- mehr überlagerter Wechselstrom kann vertragen werden (c).

Je höher die Temperatur, desto

- höher der Leckstrom (d),
- geringer Ersatzserienwiderstand und Impedanz (e),
- höher die Kapazität (e),
- weniger überlagerter Wechselstrom kann vertragen werden (f).

Der Leckstrom wächst mit zunehmender Spannung (g). Er fällt mit zunehmender Betriebszeit (h).

Die Ausfallrate steigt nicht nur mit zunehmender Lebensdauer, sondern auch mit höherer Temperatur oder Spannung (i).

Abb. 2.24 Alles verändert sich ... verschiedene Abhängigkeiten bei Aluminiumtypen (nach [2.9]).

Die Spannung über dem Elko muß in der richtigen Polung anliegen, und sie darf die Nennspannung nicht überschreiten.

Nenngleichspannung und Spitzenspannung

Kurzzeitig (z. B. beim Einschalten) darf eine höhere Spannung (Spitzenspannung) anliegen. Faustregeln:

- Aluminium: bis zu 100 V Nennspannung das 1,15fache der Nennspannung; darüber das 1,1fache,
- Tantal: das 1,3fache der Nennspannung.

Überlagerte Wechselspannung

In den üblichen Anwendungen als Sieb- und Koppelkondensator ist der anliegenden Gleichspannung eine Wechselspannung überlagert (Brummspannung, Ripple Voltage). Die Summe aus Gleichspannung und Scheitelwert der überlagerten Wechselspannung (Arbeitsspannung) darf den Wert der Nenngleichspannung nicht überschreiten.

Überspannung und falsche Polung können zur Zerstörung des Bauelements führen.

Betriebsgleichspannung

Da noch der Scheitelwert der Brummspannung hinzukommt, muß die Betriebsgleichspannung (U_{DC}) deutlich unter der Nenngleichspannung bleiben (Derating). Richtwerte:

- Aluminium mit feuchtem Elektrolyten: keinesfalls mehr als die Hälfte der Nenngleichspannung. Wird eine längere Lebensdauer angestrebt, bis auf ca. 30 % heruntergehen (50...70 % Derating). $U_{DC} \leq 0,5 \dots 0,3 U_R$.
- Tantal, Niob: 50 % Derating, also $U_{DC} \leq 0,5 U_R$.
- Aluminium mit trockenem Elektrolyten, Nioboxid-Keramik: 80 % der Nenngleichspannung sind zulässig (20 % Derating). $U_{DC} \leq 0,8 U_R$.

Umpolspannung

Manche Typen halten gar keine mit umgekehrter Polarität anliegende Spannung aus, andere dürfen mit geringen Spannungswerten belastet werden. Die Umpolspannung (Reverse Voltage U_{REV}) ist der entsprechende Datenblattwert. Faustregeln:

- Aluminium feucht: 1...2 V,
- Aluminium trocken: bis zu 20 % der Nennspannung kurzzeitig (z. B. beim Einschalten); ca. 10 % bei Dauerbetrieb,
- Tantal feucht, Silbergehäuse: 0 V (gar nichts),
- Tantal feucht, Tantalgehäuse: max. 3 V,
- Tantal trocken:
 - bei 25 °C bis 10 % der Nennspannung, aber höchstens 1 V,
 - bei 85 °C bis 3 % der Nennspannung, aber höchstens 0,5 V,
 - bei 125 °C bis 1 % der Nennspannung, aber höchstens 0,1 V.
- Der Leckstrom ist um so geringer, je höher die Nennspannung ist. Also ggf. einen entsprechend höher dimensionierten Typ wählen

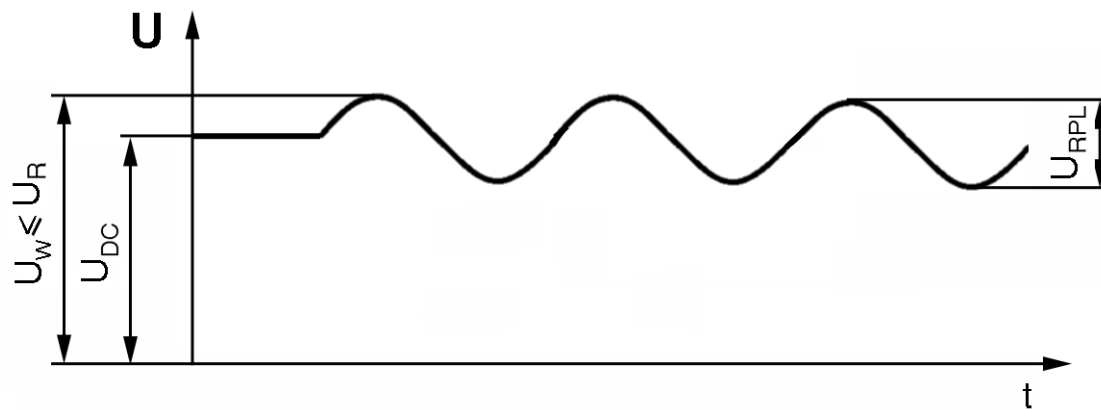


Abb. 2.25 Die Spannung über dem Elektrolytkondensator. U_{DC} - Gleichspannung; U_{RPL} - überlagerte Wechselspannung (Brummspannung, Ripple Voltage); U_W - Scheitelwert der anliegenden Spannung (Arbeitsspannung); U_R - Nennspannung.

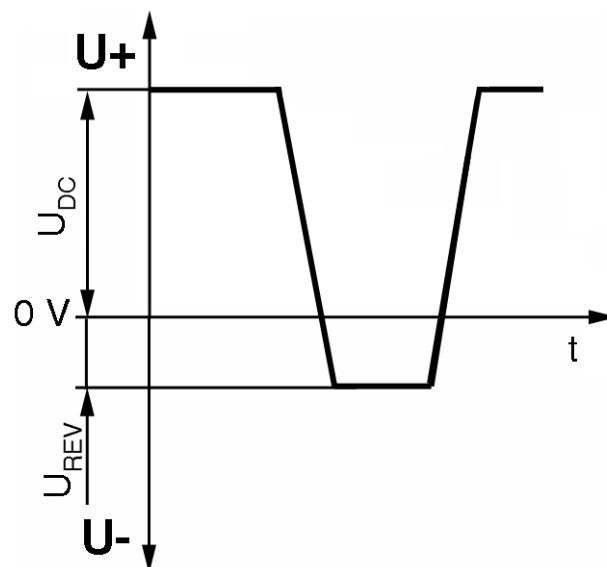


Abb. 2.26 Die Umpolspannung (U_{REV}).

Die höchste überlagerte Wechselspannung (quadratischer Mittelwert):

$$U_{RPL} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{2}} \approx 0,3535 \cdot U_R \quad (2.46)$$

Das ist praktisch ein sinusförmiger Spannungsverlauf zwischen 0 V und dem Wert der Nenngleichspannung (Abb. 2.32).

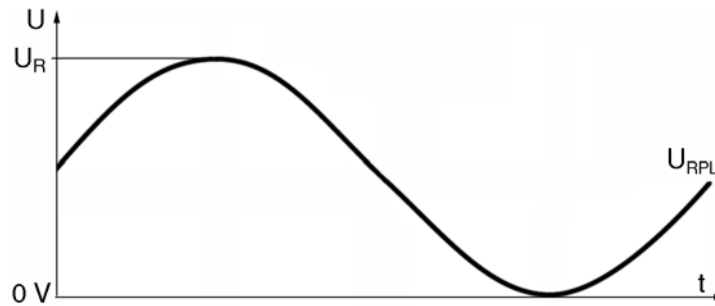


Abb. 2.27 Die höchste überlagerte Wechselspannung. Sie überschreitet weder die Nenngleichspannung noch ist sie andersherum gepolt.

Stoßstrombegrenzung

Wird an einen ungeladenen Kondensator eine Spannung angelegt, so wird der Stromstoß I_{\max} nur durch den Ersatzserienwiderstand R_{ESR} und durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle R_S begrenzt:

$$I_{\max} = \frac{U}{R_{\text{ESR}} + R_S} \quad (2.57)$$

R_S ist aber zumeist vernachlässigbar klein. Herkömmliche Aluminium- und Tantaltypen haben einen vergleichsweise hohen Ersatzserienwiderstand. Beispielsweise wurden für die ersten Tantaltypen bis zu 3Ω je V spezifiziert, um die Stoßstrombelastung in erträglichen Grenzen zu halten. Bei den in Schaltnetzteilen, Spannungswandlern usw. üblichen Arbeitsfrequenzen von einigen zehn bis über einhundert kHz sind solche Werte jedoch viel zu hoch; man spezifiziert heutzutage nicht mehr als z. B. $100 \text{ m}\Omega$ je V. Kondensatoren mit geringem ESR erfordern deshalb gelegentlich eine Begrenzung des Einschaltstromstoßes. Typische Betriebsfälle, in denen mit extremen Stoßströmen zu rechnen ist:

- das Anstecken eines Steckernetzteils, das bereits Ausgangsspannung führt*,
- das Stecken von Leiterplatten in eingeschaltete Einrichtungen (Hot Insertion),
- der Batteriewechsel bei eingeschaltetem Gerät,
- das Verbinden eines Schaltnetzteils mit der Netzspannung.

Faustregel: Zu hohe Einschaltstromstöße können sich ergeben, wenn der Kondensator einen Strom (gemäß (2.57)) von mehr als 1 A ziehen kann.

*: Beim unregulierten Steckernetzteil ist dies nicht die Betriebsspannung, sondern die beträchtlich höhere Leerlaufspannung.

Alle Gegenmaßnahmen laufen im Grunde darauf hinaus, im Stromweg einen strombegrenzenden Widerstand anzuordnen. Während des Dauerbetriebs stellt ein solcher Widerstand jedoch eine unnötige Belastung dar. Typische Schaltungslösungen:

- der Widerstand wird mit einem Relaiskontakt überbrückt, wobei das Relais nach dem Hochlaufen der Versorgungsspannung anzieht,
- der Widerstand wird mit einem Thyristor überbrückt, der nach dem Hochlaufen der Versorgungsspannung gezündet wird,
- es wird ein Heißleiter eingesetzt, der sich allmählich erwärmt und im Normalbetrieb einen entsprechend geringen Widerstandswert aufweist,
- der Begrenzungswiderstand wird mit einem Leistungs-FET realisiert, dessen Drain-Source-Widerstand (R_{DS}) durch entsprechende Ansteuerung allmählich auf den Mindestwert (R_{DSon}) verringert wird.

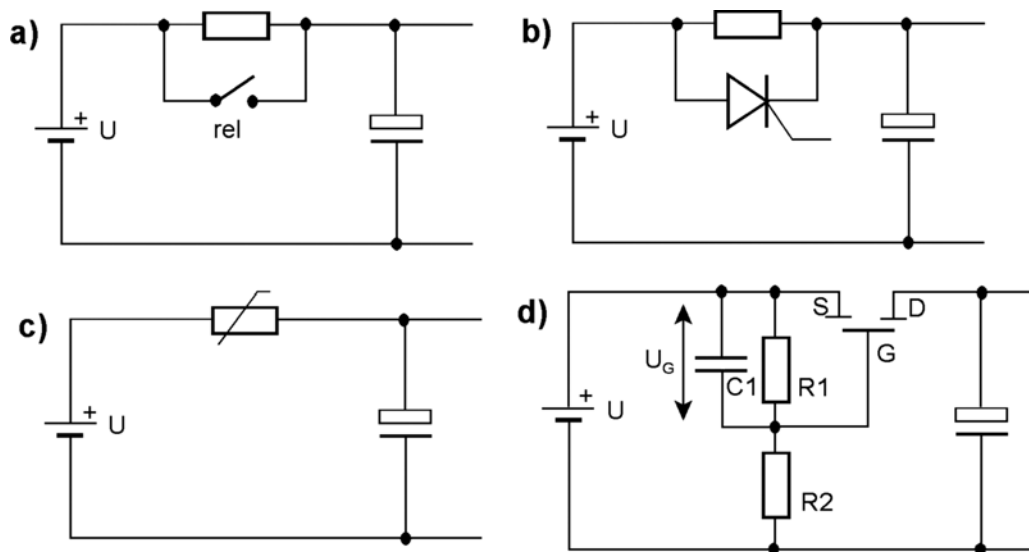


Abb. 2.28 Typische Maßnahmen zur Einschaltstrombegrenzung. a) Relais (Spule nicht dargestellt), b) Thyristor (Zündvorkehrungen nicht dargestellt); c) Heißleiter; d) Leistungs-FET (hier ein P-Kanal-Typ mit einer einfachen Ansteuerschaltung). Das Hochlaufen wird durch die Zeitkonstante $R1 \cdot C1$ bestimmt. Der Spannungsteiler $R1, R2$ ist so zu dimensionieren, daß im Normalbetrieb die Gatespannung U_G hoch genug ist, um den Transistor voll aufzusteuern (R_{DSon}), daß aber andererseits der zulässige Höchstwert nicht überschritten wird.

Entladestrombegrenzung

Wenn dem Kondensator Einrichtungen nachgeschaltet sind, die hohe Entladeströme bewirken können, ist ggf. auch hier eine Begrenzung erforderlich. Lösungen:

- Begrenzungswiderstand,
- Überstromsicherung,
- Einschaltstrombegrenzung (wie vorstehend) vor den nachgeordneten Schaltungen,
- systematisches zeitversetztes Hochfahren der angeschlossenen Einrichtungen (Power Sequencing), damit nicht zuviel Strom auf einen Schlag entnommen wird..

2.5 Energiespeicherkondensatoren

Energiespeicherkondensatoren (Doppelschichtkondensatoren)* sind Elektrolytkondensatoren, deren Elektrodenmaterial auf Kohlenstoff beruht. Sie werden als Energiespeicher eingesetzt (Abb. 2.37). In manchen Anwendungsgebieten sind sie eine Alternative zu Batterien und Akkumulatoren, in anderen können sie diese Spannungsquellen vorteilhaft ergänzen. Richtwerte: Ströme von μA bis A, Spannungen von etwa 2 V an aufwärts, Betriebszeiten von Minuten bis Stunden, Energiespeichervermögen bis zu ca. 1 Ah. Typische Einsatzfälle betreffen die zeitweilige Aufrechterhaltung der Stromversorgung bei Ausfall anderer Quellen (Backup) und der Energienachschub bei Bedarfsspitzen. Beispiele:

- Festplattenlaufwerke, die bei Ausfall der Speisespannung die noch anhängigen Schreibvorgänge zu Ende bringen und dann die Magnetköpfe parken,
- Aufrechterhaltung der Stromversorgung mobiler Geräte während des Batteriewechsels,
- Energielieferung bei Impulsbelastung, z. B. in Mobiltelefonen oder Digitalkameras. Eine hohe zeitweilige Strombelastung ergibt sich beispielsweise dann, wenn das Mobiltelefon kurz aktiv wird, um sich zu melden, oder wenn die Zoomfunktion der Digitalkamera betätigt wird. In den Impulspausen wird der Kondensator aus der Batterie nachgeladen. Da die Batterie nicht mit Impulsströmen belastet wird, kommt man mit kleinen Typen aus, die eine vergleichsweise hohen Innenwiderstand haben.

*: Warennamen u. a. Gold Caps, Supercaps, BestCaps, PowerStor, Boostcap, Maxfarad.



Abb. 2.29 Energiespeicherkondensatoren. Typische Bauformen. Flache Ausführungen (wie rechts oben) sind u. a. zur Bestückung von Geräten in Speicherkarten-Formfaktoren vorgesehen.

Aufbau und Wirkungsweise

Im Doppelschichtkondensator gibt es zwei Arten von Ladungsträgern: Elektronen auf den Elektroden und Ionen im Elektrolyten. Dort, wo sich Elektrode und Elektrolyt berühren, entsteht eine elektrische Doppelschicht, die wie ein Kondensator wirkt. Beim Laden werden die Ionen gleichsam in diese Doppelschicht hineingesaugt (absorbiert), beim Entladen werden sie wieder freigegeben.

Die Elektroden

In herkömmlichen Typen bestehen sie aus Aktivkohle. Hiermit können extreme Kapazitäten auf kleinem Raum verwirklicht werden (0,1 F...1 F und mehr; die Obergrenze liegt bei etwa 70 F). Solche Bauelemente haben eine hohe Energiedichte, aber auch einen hohen Innenwiderstand (Ersatzserienwiderstand), der die entnehmbare Stromstärke begrenzt. Weiterentwickelte Werkstoffe ermöglichen es, Kondensatoren mit geringem Ersatzserienwiderstand zu fertigen, die auch für Impulsbelastung geeignet sind.

*: Z. B. Carbon Aerogel (Cooper-Bussmann).

Der Elektrolyt

Es gibt feuchte und trockene Elektrolyten. Feuchte Elektrolyten werden z. B. in einer entsprechend getränkten Zwischenlage gehalten. Die Alternative: trockene Elektrolyten auf Basis organischer Halbleiterwerkstoffe (Conductive Polymer).

Laden und Entladen

Jedes Kohlenstoffteilchen ist praktisch ein kleiner Kondensator. Die gesamte Kapazität des Bauelements ergibt sich als Summe der mikroskopisch kleinen Teilkapazitäten. Da viele Widerstände im Stromweg liegen und da sich die Ionen vergleichsweise langsam bewegen, dauert es einige Zeit, bis ein solches Bauelement voll aufgeladen ist. Je kürzer die Ladezeit, desto weniger Energie kann entnommen werden, desto eher nimmt die Spannung an den Elektroden ab. Typische Ladezeiten liegen zwischen wenigen Sekunden und einigen Minuten.

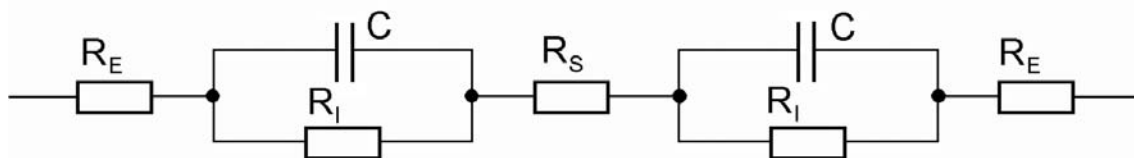


Abb. 2.30 Ersatzschaltung eines elektrochemischen Kondensators (nach [2.14]). R_E - Widerstand an den Elektroden; R_I - Isolationswiderstand; R_S - Widerstand der Ionenleitung im Elektrolyten.

Praxisschaltungen

Die einfachste Schaltung enthält neben dem Kondensatorbauelement einen Vorwiderstand und eine Sperrdiode. Energiespeicherkondensatoren sollten nicht ohne Vorwiderstand (zur Ladestrombegrenzung) an die Ladespannung gelegt werden. Die Sperrdiode verhindert, daß Strom aus dem Kondensator durch die Ladeeinrichtung fließen kann (z.B. bei ausgefallener Netzstromversorgung oder entladener Batterie).

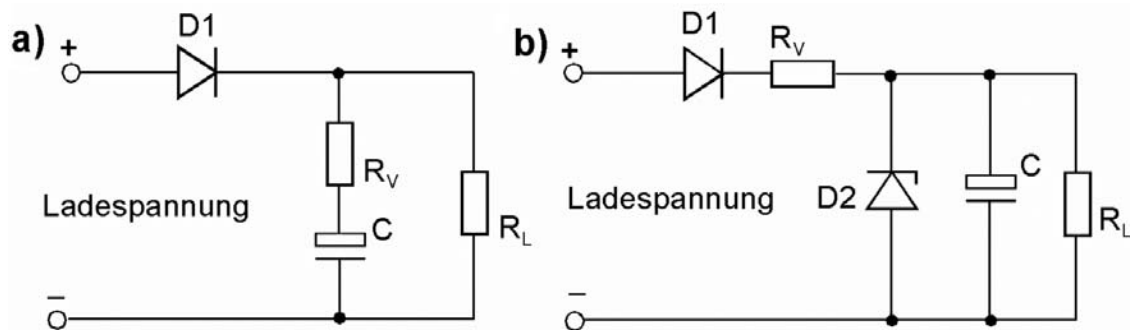


Abb. 2.31 Energiespeicherkondensatoren im Einsatz. a) für geringe kontinuierliche Stromentnahme (Backup); b) für Impulsbelastung. R_V - Vorwiderstand; R_L - Lastwiderstand (steht für die zu versorgende Einrichtung); D1- Sperrdiode; D2 - Schutzdiode (bedarfswise).

Backup-Betrieb

Ist nur eine geringe kontinuierliche Stromentnahme vorgesehen, so schadet es nicht, auch den Entladestrom durch den Vorwiderstand fließen zu lassen. Der Widerstand schützt hier nicht den Kondensator (entsprechende Typen sind kurzschlußfest), sondern den Stromweg.

Impulsbetrieb

Hierfür wählt man eigens Kondensatoren mit niedrigem ESR. Also kommt ein vergleichsweise hochohmiger Begrenzungswiderstand im Laststromweg nicht in Betracht. Falls ein Schutz gegen zu hohe Entladeströme oder Kurzschlüsse im Stromweg erforderlich sein sollte, müßten weitere Bauelemente eingefügt werden (z. B. eine selbstrückstellende Halbleitersicherung).

Schutz gegen Falschpolung

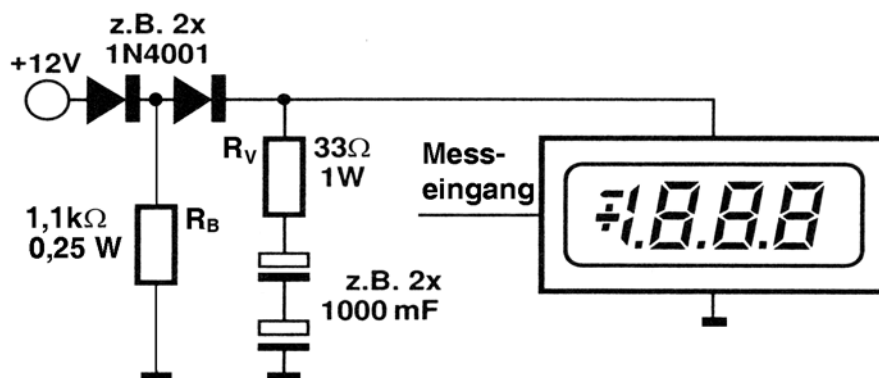
Die einfachste Lösung: eine dem Kondensator parallelgeschaltete Diode (Sperrichtung), die bei falsch gepolter Spannung leitend wird..

Schutz gegen Falschpolung und zu hohe Ladespannung: eine dem Kondensator parallelgeschaltete Zenerdiode (Sperrichtung). Zenerspannung so wählen, daß die Diode bei Überschreiten der Zersetzung- bzw. Stoßspannung anspricht. Bei falsch gepolter Spannung wirkt sie wie die zuvor beschriebene gewöhnliche Diode.

Diese Schutzmaßnahmen wirken im Sinne des Kurzschließens. Die Anordnung muß den entsprechenden Strom aufnehmen können. Es ist also zu untersuchen, was in der jeweiligen Anwendung überhaupt auftreten kann (von Störspitzen bis zu echten Kurzschlüssen, wie sie z. B. durch Bedienfehler hervorgerufen werden können). Danach sind die Gegenmaßnahmen auszuwählen (nur hinreichend dimensionieren, aber sonst nichts tun; Strombegrenzungswiderstand; Halbleitersicherung usw.).

Der Spannungsabfall über der Sperrdiode (Flußspannung) ist bei niedrigen Arbeitsspannungen nicht zu vernachlässigen. Es sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- der Spannungsabfall ist eigentlich nicht gewünscht. Ohne Rückstromsperre geht es aber auch nicht. Auswege: (1) den Ladestrom soweit verringern, daß über der Diode keine so hohe Flußspannung auftritt (Richtwert: deutlich kleiner als $0,1 \cdot$ Nennstrom); (2) eine Schottky-Diode einsetzen (0,35 V statt 0,7 V).
- der Spannungsabfall soll ausgenutzt werden, um die (höhere) Ladespannung auf die Größenordnung der Arbeitsspannung herabzusetzen. Hierzu können auch mehrere Dioden in Reihe geschaltet werden. Eine entsprechend hohe Flußspannung (z. B. 0,7 V je Diode) ergibt sich aber nur dann, wenn ein hinreichend starker Strom durchfließt (Richtwert: wenigstens $0,1 \cdot$ Nennstrom der Diode). Ggf. ist ein Belastungswiderstand vorzusehen (Abb. 2.32). Die Diode unmittelbar vor dem Kondensator kann allerdings nicht einbezogen werden, da dies darauf hinausläufe, den Belastungswiderstand direkt an den Kondensator anzuschließen, so daß er auch beim Entladen wirksam wäre.



Laden (vgl. (2.59)): $4 \cdot 0,5 \text{ F} \cdot 33\Omega$ ergeben 66 s, also etwa 1 min.

Entladen (vgl. (2.63)): Typische Werte für 3 1/2-stellige LCD-Panelmeter: Mindest-Betriebsspannung 7 V, Strombedarf 1...3,5 mA. Also gilt $U_A \approx 11 \text{ V}$, $U_E = 7 \text{ V}$; $I_L =$ Laststrom (3,5 mA). Mit den 0,5 F der dargestellten Reihenschaltung ergibt sich eine Überbrückungszeit von $\approx 570 \text{ s}$ bzw. etwa 10 min. Eine Anordnung aus vier solchen Kondensatoren (zwei Reihen zu je zwei Kondensatoren parallel) ergibt etwa 20 min.

Abb. 2.32 Schaltungsbeispiel. Ein digitales Meßinstrument in einem Wartungsfeld soll auch dann noch funktionieren, wenn die Versorgungsspannung ausgefallen ist. Die Kondensatoren haben eine Arbeitsspannung von 5,5 V und eine Zersetzungsspannung von 6,5 V. Im Interesse der Sicherheit wurden zwei Dioden vorgeschaltet (max. 1,4 V Spannungsabfall). Damit wenigstens 0,7 V auch dann abfallen, wenn der Kondensator (nahezu) keinen Ladestrom aufnimmt, wird ein Mindeststrom von ca. 11 mA erzwungen (Belastungswiderstand R_B).

2.6.2 Präzise Zeit- oder Frequenzdarstellung (durch RC- oder LC-Glieder)

In welchen Zeit- oder Frequenzbereichen dies möglich ist, hängt davon ab, in welchen Kapazitätsbereichen eng tolerierte und in ihren Kennwerten stabile Bauelemente verfügbar sind. Große Kapazitäten für lange Zeiten oder niedrige Frequenzen bereiten die größten Schwierigkeiten. Eng tolerierte Typen gibt es nur mit vergleichsweise geringen Kapazitätswerten. Weitere Gesichtspunkte – z. B. der Temperaturgang – schränken die Auswahl noch stärker ein.

Dielektrikum	Wertebereich
Polypropylen	100 pF...100 nF
Polystyrol	100 pF...10 nF
Keramik	10 pF...470 pF
Glimmer	39 pF...47 nF

Tabelle 2.16 Kondensatoren mit einer Kapazitätstoleranz von +- 1%. Hier ein typisches Angebot*.

*: Gemäß parametrischer Suche im Internet.

Die längsten auf kostengünstige Weise* einigermaßen präzise darstellbaren Zeitkonstanten liegen bei mehreren nF • mehreren kΩ, also im Bereich von einigen μs bis zu einigen ms. Die Impulsbreite einer RC-Kippstufe beträgt etwa $0,7 \tau$ (Richtwert). Eine Periode besteht aus $0,7 \tau$ Impuls und $0,7 \tau$ Pause. Sie dauert also insgesamt $1,4 \tau$. Das ergibt eine Impulsfolgefrequenz von $0,7/\tau$. Beispiele:

- Keramik: $200 \text{ pF} \cdot 5 \text{ k}\Omega = 1 \text{ }\mu\text{s}$; minimale Impulsfolgefrequenz also 700 kHz,
- Polypropylen: $100 \text{ nF} \cdot 100 \text{ k}\Omega = 10 \text{ ms}$; minimale Impulsfolgefrequenz also 70 Hz.

*: Soll heißen: mit Bauelementen aus dem allgemein üblichen Angebot, nicht mit kostspieligen Spezialitäten (wie beispielsweise Teflon-Kondensatoren).

Praxistip: Größere Zeiten / geringere Frequenzen nicht mit dicken Kondensatoren darstellen*. Statt dessen von gut darstellbaren Frequenzen (einige hundert Hz bis einige hundert kHz) ausgehen und den Rest digital erledigen (Zeitählung, Frequenzteilung).

*: Und schon gar nicht mit den herkömmlichen Aluminium-Elkos. Die Toleranzen sind lausig, und sie leben nicht besonders lange.