

Die Potentiometer aus Draht sind am höchsten belastbar (bis zu 100 W). Dem Trend von der Analog- zur Digitaltechnik folgend, ersetzt man die genauen Potentiometer zunehmend durch Schaltungen mit AD-Wandlern.

– Schiebepotentiometer

Der Schleifer ist von außen durch eine Schiebenahe zu betätigen. Solche Schiebepotentiometer benutzt man häufig in der Unterhaltungselektronik.

– Spindel-Potentiometer

Im Prinzip handelt es sich dabei um ein Schiebepotentiometer, das aber den Schleifer ganz fein mit einem Spindeltrieb einstellen kann.

– Trimmer-Potentiometer

Bei einem Trimmer stellt man meist mit Hilfe eines Schraubendrehers die Arbeitspunkte oder Spannungspegel in elektronischen Schaltungen ein. Üblicherweise handelt es sich um Kohleschicht-Potentiometer. Da man die Potentiometerstellung nur selten verändert, prüft man diese Bauelemente nur mit 100 Zyklen.

Die Potentiometer sind (außer bei Trimmern) vorwiegend als *Stellglieder* zur Umsetzung von Weg- und Winkelinformationen für die Bedienung von Geräten in Gebrauch. Die dabei auftretenden Informationen gehen als Ist- oder Sollgröße in elektronischen Schaltungen zu Steuer- und Regelzwecken ein.

Zur Übung

Ü 2.2-1: Ein Kohleschichtwiderstand der Größe 0207 besitzt laut Datenblatt folgende Werte: $P_{70} = 0,33$ W, $U_{\max} = 250$ V und $R_{\text{krit}} = 200$ k Ω . a) Wie groß ist der kritische Widerstand R_{krit} ? b) Es sind die Widerstandswerte $R_{N1} = 100$ k Ω und $R_{N2} = 470$ k Ω vorhanden. Entscheiden Sie, welche Widerstandswerte auf Grund der Spannungen U_{\max} nicht mit der vollen Leistung P_{70} belastet werden dürfen.

2.3 Kondensatoren

Ein Kondensator besteht prinzipiell aus zwei elektrisch leitfähigen Flächen (auch *Elektroden* oder *Beläge* genannt), die durch einen Isolator (*Dielektrikum*) voneinander getrennt sind (Bild 2-27).

Ein Kondensator kann Ladung *speichern*. Die *Kapazität* C als Maß für das Speichervermögen des Kondensators gibt an, wieviel Ladung Q pro Spannungseinheit U gespeichert werden kann ($C = Q/U$). Die Einheit der Kapazität ist

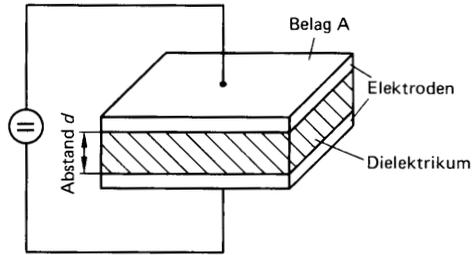


Bild 2-27. Aufbau eines Kondensators.

das *Farad* F (M. FARADAY, 1791 bis 1867): $1 F = 1 \text{ As/V}$. Das heißt, ein Kondensator besitzt die Kapazität C von 1 F, wenn bei einem Strom von 1 A innerhalb von 1 Sekunde (s) die Spannung U auf 1 V ansteigt (Definition nach DIN 1301). Das Farad ist eine sehr große Einheit. In der Praxis eingesetzte Kondensatoren besitzen nur Bruchteile eines Farads (mF, μF , nF oder pF). Der Kondensator kann im Gleichstrom- und im Wechselstromkreis eingesetzt werden und erfüllt dabei im wesentlichen folgende Funktionen:

- Ladungsspeicher im Gleichstromkreis und
- frequenzabhängiger Widerstand im Wechselstromkreis.

Mit der gespeicherten Ladung bei der Spannung U besitzt der Kondensator den Energieinhalt $E = 1/2 CU^2$. Für den frequenzabhängigen Widerstand gilt: $X_c = 1/(\omega C)$ in Ω . Wie in Abschn. 1.6.3.3 (Bild 1-44) ausführlich dargestellt wurde, eilt beim verlustfreien Kondensator der Strom I der Spannung U um 90° voraus. Die Kapazität C eines Platten-Kondensators errechnet sich nach

$$C = \epsilon A/d. \quad (2-24)$$

ϵ ist die *Permittivität* des Dielektrikums ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$; dabei ist ϵ_0 die elektrische Feldkonstante und ϵ_r die Permittivitätszahl), A die wirksame Elektrodenoberfläche und d der Abstand der Elektroden (oder die Dicke d des Dielektrikums). Die Kapazität C eines Kondensators ist nach Gl. (2-24) um so größer, je höher die Permittivität ϵ oder die Permittivitätszahl ϵ_r ist, je größer die Elektrodenfläche A und je kleiner der Elektrodenabstand d ist. In der Technik wählt man deshalb folgende Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazität und kombiniert sie miteinander, soweit dies möglich ist:

- Dielektrika mit sehr hohen ϵ_r -Werten (z. B. Keramik-Kondensator),

- *Vergrößerung der Fläche A durch Aufwickeln der Elektroden und des Dielektrikums (Wickelkondensator), durch mehrere Schichten (Schichtkondensator) oder Aufrauen der Elektrodenoberfläche durch Ätzen (z. B. Aluminium-Elektrolytkondensator) oder Sintern (z. B. Tantal-Elektrolytkondensator),*
- *Verringern der Dicke d durch dünne Folien (Wickelkondensator, Schichtkondensator) oder durch dünne Oxidationsschichten (Aluminium- und Tantal-Elektrolytkondensator).*

Aus diesen Möglichkeiten lassen sich entsprechende Bauformen ableiten, die immer auch für die speziellen Einsatzbedingungen geeignet sein müssen.

Bei Kondensatoren steigen, trotz ständiger Verkleinerung des Kondensatorvolumens, die Belastungen zunehmend. Darum muß man die Belastbarkeitsgrenzen der Materialien und Bauformen (z. B. für Spannungen, Ströme, Betriebstemperaturen, Eigenerwärmung oder Kapazitätsstabilität) experimentell genau ermitteln, und die Anforderungen der Anwender genau kennen. Die Angabe von Kapazität und Spannung allein genügt deshalb nicht, um den geeigneten Kondensator für den jeweiligen Einsatzfall herauszufinden. Dazu sind weitere Daten erforderlich, wie beispielsweise

- Spannungsform, Betriebsfrequenzen, Ströme,
- Einsatztemperaturen und Kühlbedingungen,
- Zuverlässigkeitsforderungen (Lebensdauer, Ausfallrate, Kapazitätsstabilität),
- mechanische Anforderungen (Anschlußelemente, Schwingungen),
- klimatische Beanspruchung,
- Einbaulage und die
- Beanspruchung bei der Verarbeitung (z. B. Lötbedingungen).

Datenblätter für die einzelnen Kondensatoren geben zumindest teilweise Auskunft über die entsprechenden zulässigen Werte.

2.3.1 Übersicht über die Kondensatoren

Bild 2-28 zeigt eine Einteilung der Fest-Kondensatoren sowie die einstellbaren Kondensatoren. In dieser Übersicht sind die einzelnen Typen und an Hand von Schnittbildern ihr prinzipieller Aufbau angegeben, ferner die wichtigsten Kennwerte wie Nennspannungs- und Kapazitätsbereiche, Verlustfaktor, gespeicherte

Energie pro Volumen und Frequenzbereich. Auch wird auf umfangreiche Normen und Qualitätsvorschriften verwiesen (weltweit IEC: International Electrotechnical Commission; für Europa CENELEC: Comité Européen de Normalisation Electrotechnique; CECC: CENELEC Electronic Components Committee sowie die nationalen Normen VDE und DIN). Aus der Übersicht sind zusätzlich die wichtigsten Anwendungsbereiche und die häufigsten Bauformen zu erkennen. Das Diagramm rechts zeigt, in welchen Spannungs- und Kapazitätsbereichen die einzelnen Kondensatoren Anwendung finden.

Zum Verständnis des Verhaltens von Kondensatoren sind folgende Kenngrößen von Bedeutung:

Nennspannung

Mit dieser Gleichspannung kann man den Kondensator im Dauerbetrieb ohne Schaden betreiben. Dies gilt allerdings nur für eine eingeschränkte Betriebstemperatur (z. B. $\leq +85^\circ\text{C}$), da bei höheren Temperaturen beispielsweise die zulässige Dauergrenz-Spannung abfällt (*Spannungs-Derating*).

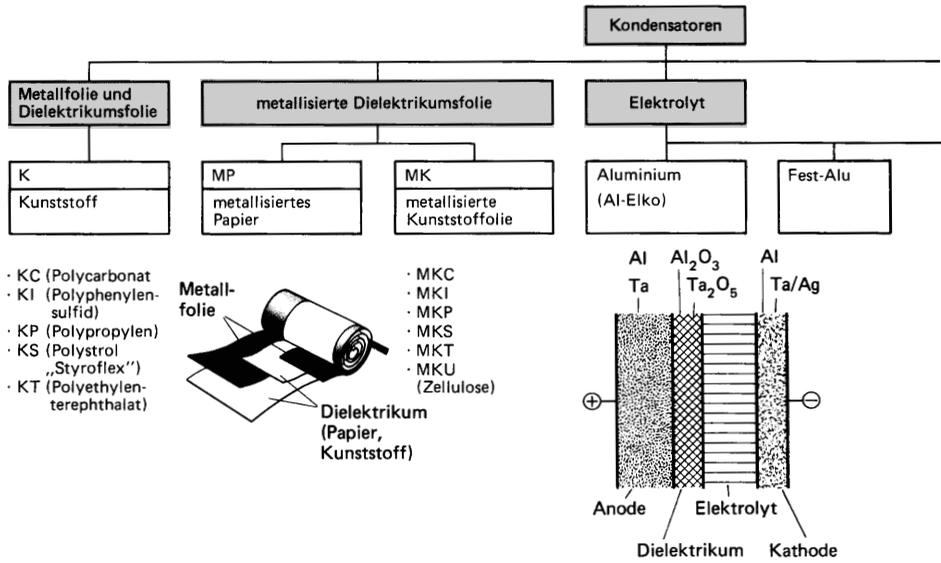
Kapazitätstoleranz

Sie gibt an, um wieviel Prozent der Kapazitätswert vom Sollwert abweichen darf. Die Toleranz muß bei 20°C im Neuzustand des Kondensators eingehalten werden. Durch Lagerung und/oder Betrieb kann die Toleranz größer werden. Die Toleranzangabe ist meist auf das Gehäuse oder die Umhüllung des Kondensators aufgedruckt.

Verlustfaktor $\tan \delta$

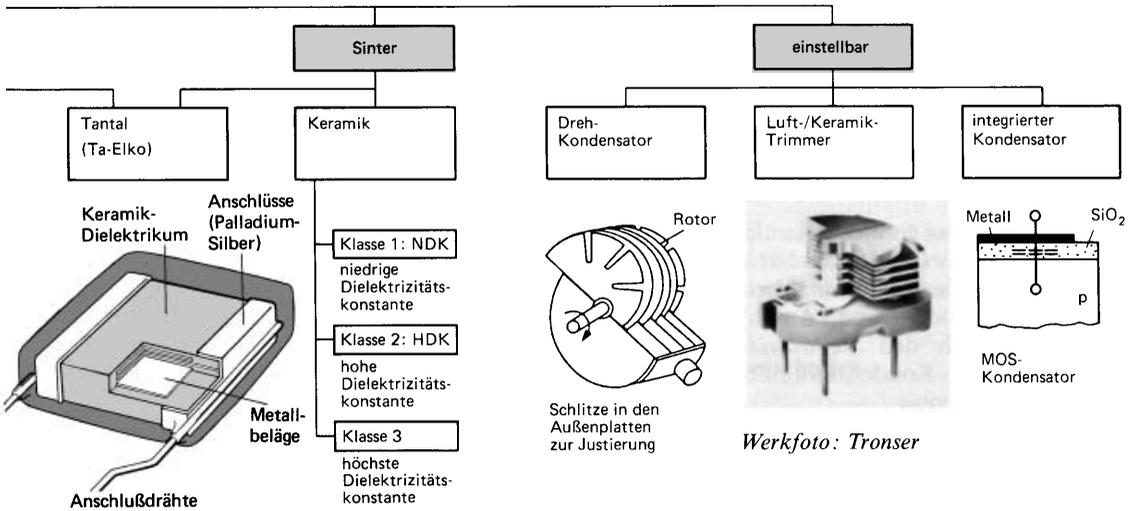
Jeder Kondensator enthält im Betrieb verlustbehaftete Komponenten: Ohmsche Widerstände der Elektroden und Zuleitungen sowie Dipolumlagerungen und Ionenleitung im Dielektrikum. Diese Verluste gibt der Verlustfaktor $\tan \delta = \text{Wirkleistung}/\text{Blindleistung}$ an. Bild 2-29 zeigt das zugehörige Ersatzschaltbild des Kondensators.

Die Verluste im Dielektrikum sind dargestellt durch R (in der Regel kein Ohmscher Widerstand). Parallel dazu liegt der *Isolationswiderstand* R_{isol} , der jedoch nur bei niedrigen Frequenzen wichtig ist. Die ohmschen Verluste



Nennspannung	50 V bis 630 V	200 V bis 5 kV	50 V bis 2 kV	6 V bis 600 V
Kapazitätsbereich	2 pF bis 500 nF	100 pF bis 10 mF	100 pF bis 10 µF	1 µF bis 1 F
Verlustfaktor $\tan \delta \cdot 10^{-3}$	10 kHz: 0,1 bis 1	1 kHz: 4 bis 15	10 kHz: 0,25 bis 10	50 Hz: 80
gespeicherte Energie pro Volumen	mittel	mittel	mittel	hoch
Güte	1000	1000	1000	gering
Frequenzbereich	Gleichspannung und Niederfrequenz bis MHz-Bereich			NF und Gleichspannung
Normen	IEC 384-7/11/12/13 CECC 30100 CECC 30900 CECC 31700 CECC 31800 DIN 45910-22/25/26 /27		IEC 384-2/6/16 CECC 30400 CECC 30500 CECC 31200 CECC 32200 DIN 45910-11/13/23 /28	IEC 384-11 CECC 30300
Anwendungsbereiche	Schwingkreise, Koppel- Filter-Kondensator, Kfz-Elektronik, Schaltnetzteile, Impulsschaltungen	Motorkondensator, Filterkondensator, Stoßkondensator, Funkentstörkondensator		Energiespeicher, Sieben bei niedrigen und hohen Frequenzen
Bauformen	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">BT </div> <div style="text-align: center;">SA </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: center; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">CFC </div> </div>			<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;">KS </div> <div style="margin-bottom: 10px;">ES </div> <div>V (Chip) </div> </div>

Bild 2-28. Übersicht über die Kondensatoren (Luft-/Keramik-Trimмер).

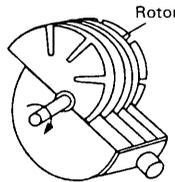
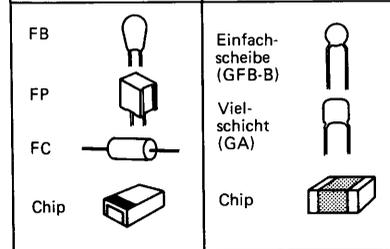


Anschlußdrähte

6 V bis 125 V	4 V bis 500 V
100 nF bis 1 mF	1 pF bis 1 µF
120 Hz: 40 bis 350	1 kHz: ≤ 60
hoch	gering (Klasse 3: mittel)
gering	Klasse 1: hoch bis sehr hoch Klasse 2,3: gering
NF und Gleichstrom	NF und HF
CECC 30200 CECC 30800	CECC 30600 CECC 30700 CECC 31100 CECC 31400 CECC 31500 CECC 32100

Meß- und Regeltechnik, Datentechnik, Kommunikationstechnik, Schaltnetzteile

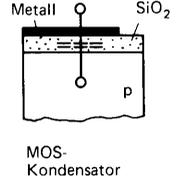
Datentechnik, Kfz-Elektronik, Kommunikationstechnik, automatisch bestückbar auf Leiterplatten



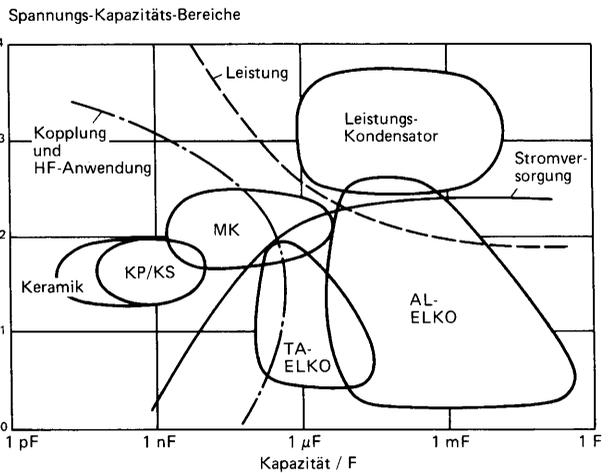
Schlitze in den Außenplatten zur Justierung



Werkfoto: Tronser



MOS-Kondensator



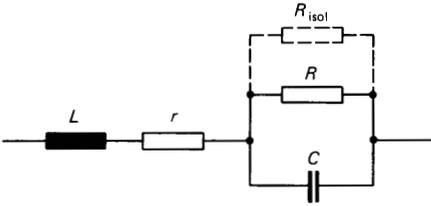


Bild 2-29. Ersatzschaltbild für einen realen Kondensator.

ergeben sich aus der endlichen Leitfähigkeit der Elektroden und aus Widerständen der inneren Zuleitungen sowie aus Kontaktwiderständen zwischen Elektroden und Anschlußdrähten (dargestellt durch den Reihenwiderstand r). Jeder technische Kondensatoraufbau besitzt eine Eigeninduktivität L .

Isolationswiderstand und Zeitkonstante

Für die Güte eines Kondensators wird der Isolationswiderstand R_{isol} in $M\Omega$ angegeben als Verhältnis von angelegter Gleichspannung zum Isolationsstrom (meist eine Minute nach Aufladung des Kondensators gemessen). Die Selbstentladungs-Zeitkonstante $\tau = R_{isol} C$ in $M\Omega \cdot \mu F = s$ gibt an, wieviel Sekunden nach Abtrennung von der Spannungsquelle die Spannung zwischen den Anschlüssen eines geladenen Kondensators auf 37% abgesunken ist. Typische Werte für Kondensatoren mit Papierdielektrikum sind $\tau \approx 5000 s$ und mit Kunststoffdielektrikum $\tau \approx 50000 s$, gemessen bei Raumtemperatur.

Temperaturkoeffizient der Kapazität

Die Kapazität C bei einer bestimmten Umgebungstemperatur errechnet sich aus der Kapazität C_{20} bei $20^\circ C$, der Umgebungstemperatur ϑ und dem Temperaturkoeffizienten α wie folgt

$$C = C_{20} [1 + \alpha(\vartheta - 20)] \quad (2-25)$$

Somit gibt der Temperaturkoeffizient α an, um welchen Bruchteil sich der bei $20^\circ C$ gemessene Kapazitätswert reversibel ändert, wenn die Umgebungstemperatur um 1 K ansteigt. Der Temperaturkoeffizient α kann positiv oder negativ sein (Bild 2-30 und 2-31). Sein Verlauf beeinflusst vor allem die Resonanzfrequenz eines Schwingkreises.

Impulsbelastbarkeit

Eine Spannungsänderung du verursacht am

Kondensator eine Ladungszunahme $dQ = i dt$ nach der Gleichung $i dt = C du$. Wird diese Gleichung nach dem Strom i umgestellt, so ergibt sich

$$i = C (du/dt) \quad (2-26)$$

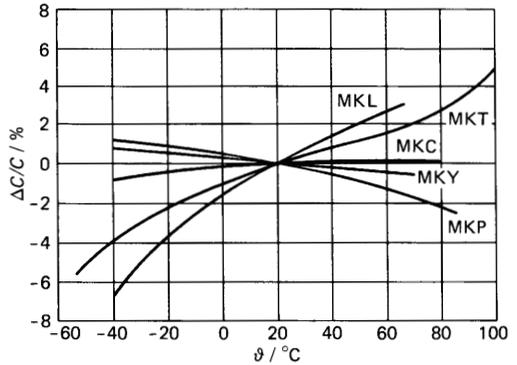


Bild 2-31. Relative Kapazitätsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur.

Deshalb bewirken Spannungsimpulse mit einer Flankensteilheit $F = du/dt$ impulsförmige Ströme i durch den Kondensator. Bei einem Spannungsimpuls der Dauer T wird am Kontaktwiderstand r_K (Teil von r in Bild 2-29) die Energie

$$E = r_K \int i^2 dt = r_K C^2 \int (du/dt)^2 dt \quad (2-27)$$

in Wärme umgesetzt. Zu hohe Ströme können so die Kontaktierung zwischen Elektroden und Anschlußdrähten schädigen. Besonders Kondensatoren mit dünnen metallisierten Elektroden (s. Abschn. 2.3.2.1) sind durch Abbrand solcher dünner Kontakte gefährdet. Deshalb gibt man in den Datenblättern für jeden Typ die zulässige Flankensteilheit F_N für den Spannungshub um die ganze Nennspannung U_N in $V/\mu s$ an. Nach Gl. (2-27) ist für gleiche Werte des Integrals die gleiche Kontaktbelastung zu erwarten (bei konstant gehaltenem r_K und C). Dann gilt: Je kleiner der Spannungshub und damit die Impulsdauer T , um so größere Werte darf dU/dt annehmen. Die maximale Flankensteilheit F_{max} errechnet sich aus der Nenn-Flankensteilheit F_N und den entsprechenden Spannungen wie folgt

$$F_{\max} = (U_N/U_B) F_N \quad (2-28)$$

Beispiel

2.3-1: Für eine Nennspannung $U_N = 63 \text{ V}$ beträgt die Flankensteilheit $F_N = 45 \text{ V}/\mu\text{s}$. Die Betriebsspannung U_B liegt bei 8 V . Wie groß ist die maximale Flankensteilheit F_{\max} ?

Lösung:

Nach Gl. (2-28) ergibt sich für $F_{\max} = (63 \text{ V}/8 \text{ V}) 45 \text{ V}/\mu\text{s} = 354,4 \text{ V}/\mu\text{s}$.

2.3.2 Kondensatoren mit dünnen Folien als Dielektrikum

2.3.2.1 Aufbau

Bei den Kondensatoren mit *Metallfolien* liegt zwischen den Metall-Elektroden (meist aus Aluminiumfolie) ein Dielektrikum aus imprägniertem Papier oder aus Kunststoff. Metallfolien und Dielektrika werden aufgewickelt; im abgewickelten Zustand stellen sie einen Plattenkondensator dar. Die Kunststoffolien haben das Papier wegen ihres niedrigeren Verlustfaktors, ihrer großen Homogenität und ihrer Herstellbarkeit in kleinen Dicken teilweise verdrängt. Von den Kunststoffen (K) sind als Dielektrikum vor allem Polycarbonat (KC), Polypropylen (KP), Polystyrol (KS) und Polyester (Polyethylenterephthalat KT) im Einsatz (s. Bild 2-28 und Tabelle 2-5).

Bei Kondensatoren mit metallisierten Belägen werden die Dielektrika (Papier oder Kunststoff) mit Metall (häufig Aluminium oder Zink) be-

dampft und so die Elektroden sehr platzsparend erzeugt (s. Abschn. 2.3.2.3). Metallisierte Papierfolien haben meist die Abkürzung MP, metallisierte Kunststoffolien MK. Bei den Kunststoffen dient ein weiterer Buchstabe zur Kennzeichnung der Kunststoffart (z. B. MKP: metallisierte Kunststoffolie aus Polypropylen und ein Kondensator mit der Bezeichnung KP: Aluminiumfolie mit Polypropylen als Dielektrikum). Die Kunststoffolien werden in Dicken unter $2 \mu\text{m}$ verwendet. Eine wichtige Eigenschaft der MK- und MP-Kondensatoren ist die Fähigkeit zur Ausheilung nach erfolgten Durchschlägen.

2.3.2.2 Eigenschaften

In Bild 2-30 sind Diagramme für die wichtigsten Kenngrößen der Kondensatoren mit Folien-Dielektrikum zusammengestellt (die roten Linien gelten für die Folien, die schwarzen Linien für Kondensatoren mit Metallfolien, die schwarzen Linien für die metallisierten Typen).

Wie aus Bild 2-30 zu entnehmen ist, hängt die Kapazität mehr oder weniger stark von der Temperatur ab. Das Temperaturverhalten ist aber weitgehend reversibel und zwischen den Temperaturen von etwa -20°C und $+70^\circ\text{C}$ annähernd linear. Eine vergleichende Zusammenstellung zeigt Bild 2-31. Daraus ist zu ersehen (rote Linie), daß der Kondensator mit einer Polycarbonat-Folie (KC, MKC) einen annähernd konstanten Temperaturverlauf aufweist.

In Tabelle 2-5 sind die wichtigsten Kennwerte für einige Dielektrika aus Kunststoff zusammengestellt.

Der mit dem außen liegenden Kondensator-

Tabelle 2-5. Eigenschaften von Dielektrika aus Kunststoff.

Eigenschaft \ Kunststoff	Polycarbonat	Polypropylen	Polyester
Permittivitätszahl ϵ_r (1 kHz; 23°C)	2,8 (temperaturkonstant)	2,2 (bei zunehmender Temperatur negativ)	3,3 (bei zunehmender Temperatur positiv)
Spezifischer Durchgangswiderstand $\rho/\Omega \text{ cm}$ (23°C)	$2 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{18}$	10^{18}
Durchschlagsfestigkeit in $\text{V}/\mu\text{m}$ (23°C)	535 V	650 V	580 V
Temperaturbereich	-55°C bis 100°C	-55°C bis 85°C	-55°C bis 100°C

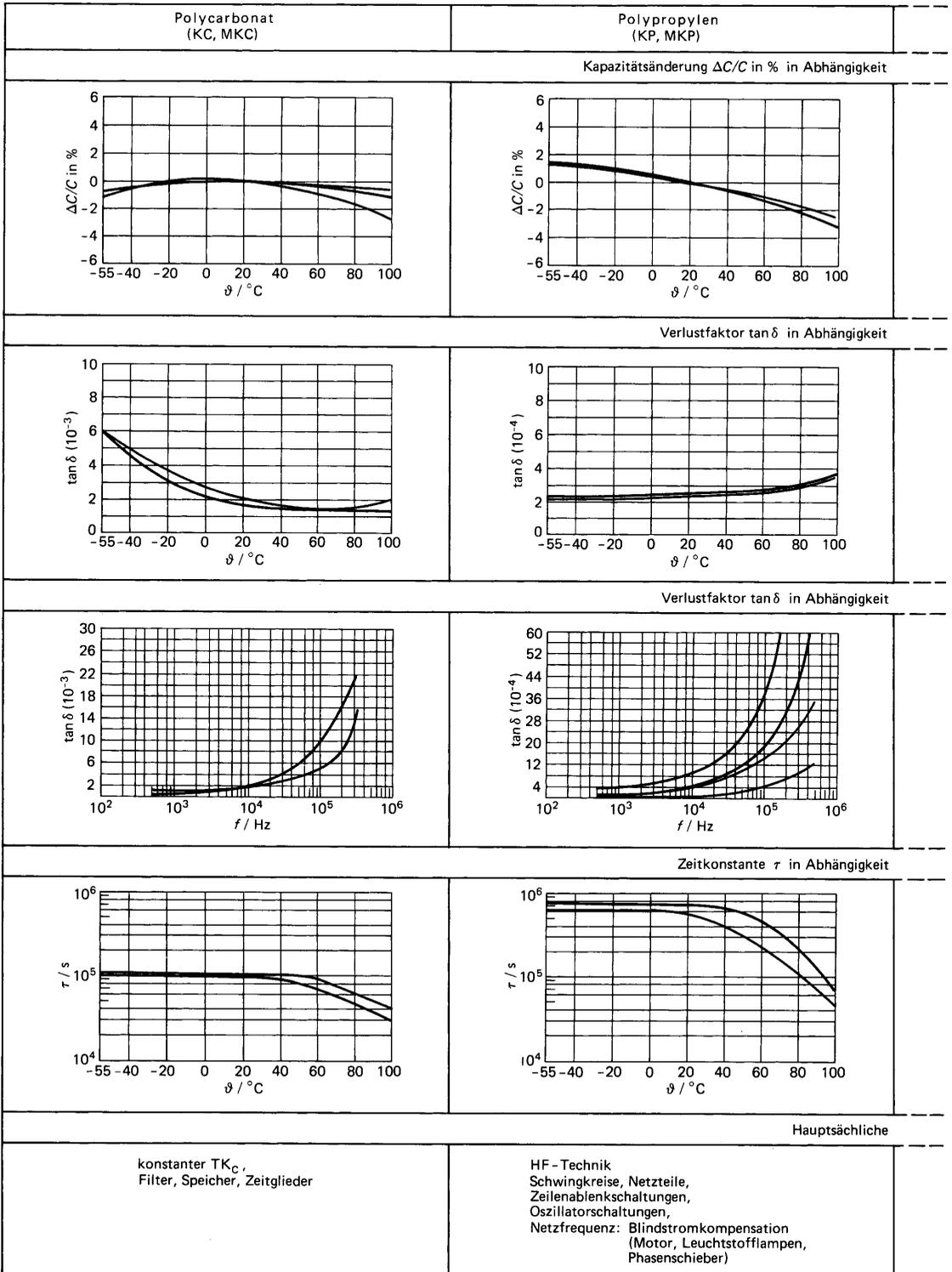


Bild 2-30. Wichtige Eigenschaften und Anwendungsfelder für Folien-Kondensatoren.

Polyester (KT, MKT)	Papier (MP)
von der Temperatur ϑ ($^{\circ}\text{C}$) bei $f = 1 \text{ kHz}$	
von der Temperatur ϑ ($^{\circ}\text{C}$) bei $f = 1 \text{ kHz}$	
von der Frequenz f	
von der Temperatur ϑ ($^{\circ}\text{C}$)	
Anwendungen	
<p>Koppeln, Entkoppeln, Abblocken Impuls-, Filter-, Entstörschaltungen</p>	<p>Funk-Entstörung Energieelektronik: Filter-, Stütz-, Stoßkondensator</p>

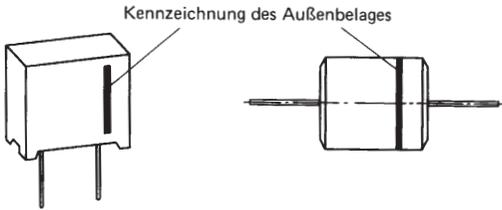


Bild 2-32. Kennzeichnung des Außenbelages.

belag verbundene Anschlußdraht wird durch einen Strich oder einen Ring auf dem Gehäuse gekennzeichnet (Bild 2-32).

Verbindet man in hochohmigen Kreisen den Außenbelag des Kondensators mit dem jeweils niederohmigeren Teil („Masse“) der Schaltung, so wirkt er wie ein Faradayscher Käfig als Abschirmung gegen äußere elektrische Störfelder, wie beispielsweise das elektrische Feld der Netzspannung.

2.3.2.3 Selbstheilende Kondensatoren (MP und MK)

Bei selbstheilenden Kondensatoren bestehen die Elektroden (Beläge) nicht aus Metallfolien (Dicke etwa 6 µm bis 20 µm), sondern aus sehr dünnen (0,02 µm bis 0,05 µm), im Hochvakuum aufgedampften Metallbelägen (metallisierte Papierfolie: MP oder metallisierte Kunststoffolie: MK). Die Selbstheilung kommt folgendermaßen zustande: Der bei einem Durchschlag entstehende Lichtbogen verdampft den Metallbelag in der Umgebung der Durchschlagstelle. Dadurch wird die Durchschlagstelle vom elektrisch aktiven Belag abgetrennt. Der Selbstheilvorgang dauert weniger als 10 µs; die Strom- und Energiezufuhr zur Durchschlagstelle ist begrenzt. Da der Metallbelag nur in der unmittelbaren Umgebung der Durchschlagstelle verdampft, ist die Kapazitätsabnahme auch nach vielen Selbstheilvorgängen gering (z. B. etwa 1% nach 1000 Durchschlägen).

Im Gegensatz zu Elektroden aus Metallfolien kann der aufgedampfte Metallbelag nicht durch Kontaktstreifen kontaktiert werden. Selbstheilende und impulsfeste Kondensatoren werden deshalb an den Wickel-Stirnseiten vollflächig kontaktiert. Dazu ist es erforderlich, daß das Dielektrikum (Papier oder Kunststoff) auf einer Seite nicht bis zum Rand bedampft wird, um die Isolierung der beiden Beläge gegeneinander sicherzustellen. Bild 2-33 zeigt den Aufbau. In Bild 2-33a sind der Belag 1 und der Belag 2

jeweils mit unbedampftem Rand dargestellt. Bild 2-33 b zeigt einen Wickel-Teilbereich mit einem erfolgten Durchschlag.

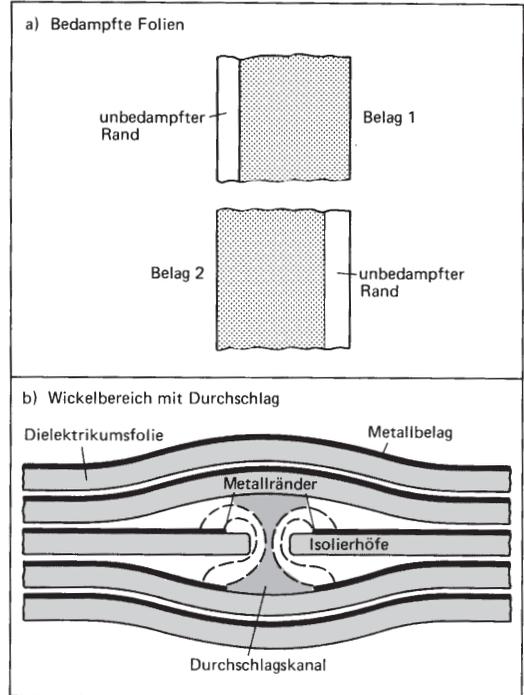


Bild 2-33. Aufbau eines metallisierten, ausheilfähigen Kondensators mit erfolgtem Durchschlag.

Auf die Stirnseite des fertigen Wickels wird im Flammsspritzverfahren Metall (häufig Zink) aufgespritzt (Schoopen). Dadurch sind alle Belagwindungen kontaktiert. Zuleitungswiderstand und -induktivität sind sehr gering (dämpfungsarme Kondensatoren). Dies ist Voraussetzung, wenn der Kondensator bei höheren Frequenzen oder bei Spannungen mit hochfrequenten Anteilen im Einsatz ist.

2.3.2.4 Kondensatoren für die Leistungselektronik

Ein spezielles Anwendungsgebiet für Kondensatoren mit Folien als Dielektrikum ist die Leistungselektronik im Spannungsbereich von 50 V bis 10000 V (VDE 0560, Teil 12). In Schaltungen mit Leistungshalbleitern erfüllen die Kondensatoren folgende Aufgaben:

- Filtern von unerwünschten Oberwellen; die Kondensatoren werden zwischen dem Gleichstromnetz und dem Gleichstromsteller eingesetzt.

- Stützen der Gleichspannung im Zwischenkreis bei spannungsgeführten Umrichtern (periodische Abgabe kurzer und hoher Stromimpulse).
- Aufnahme oder Abgabe starker Stromstöße (Laser; Kopierer).
- Bedämpfen oder Unterdrücken unerwünschter Spannungsspitzen an Halbleiterbauelementen (Trägerstauereffekt in Leistungsdioden, Leistungsthyristoren, GTO-Thyristoren, s. Abschn. 5).
- Kommutieren, d. h. Löschen des leitenden Zustandes von Thyristoren in Gleichstromstellern und zwangsgeführten Wechselrichtern.

Für diese Einsatzgebiete müssen die Kondensatoren folgende Eigenschaften aufweisen:

- Hohe Spitzenstrom-Belastbarkeit.
- Hohe Spannungsfestigkeit.
- Niedrige Eigeninduktivität.
- Hohe Energie-Speicherfähigkeit.
- Große Zuverlässigkeit auch bei thermischer Belastung. Zum Einsatz kommen je nach Anforderungsprofil die Bauformen: Metallfolien-Kondensator, MP-Kondensator, MKP-Kondensator und MKV-Kondensator.

Die letzten beiden Bauformen werden im folgenden näher beschrieben.

MKP-Kondensator

Wie die Kurzbezeichnung aussagt, handelt es sich dabei um einen Kondensator mit einem Dielektrikum aus einer *metallisierten Polypropylenfolie*. Die Vorteile dieser Bauform sind:

- niedrige Verluste im Dielektrikum,
- trockener Aufbau, d. h. kein flüssiges Imprägniermittel,
- kleines Volumen,
- preisgünstiges Material für das Dielektrikum.

Nachteilig sind die relativ geringe Spitzenstrombelastbarkeit und die nur mäßige Kapazitätsstabilität (Kapazitätsabnahme im Laufe der Betriebszeit). Der MKP-Kondensator hat sich durchgesetzt für den Spannungsbereich 250 V bis 600 V und für einfachere Anwendungen.

MKV-Kondensator

Dieser Kondensatortyp besitzt einen besonderen Aufbau. Ein Kondensatorpapier wird als Elektrode *beidseitig* mit *Metall bedampft* und liegt dadurch nicht im elektrischen Feld. Als Dielektrikum dient eine Polypropylenfolie, die dafür sorgt, daß vom aufgedampften Metall keine Spitzenwirkungen ausgehen können und deshalb an jeder Stelle dieselbe Durchschlagfestigkeit herrscht. Bild 2-34 zeigt im Teilbild a den schematischen Aufbau des Wickels und im Teilbild b das Schnittbild eines Leistungskondensators.

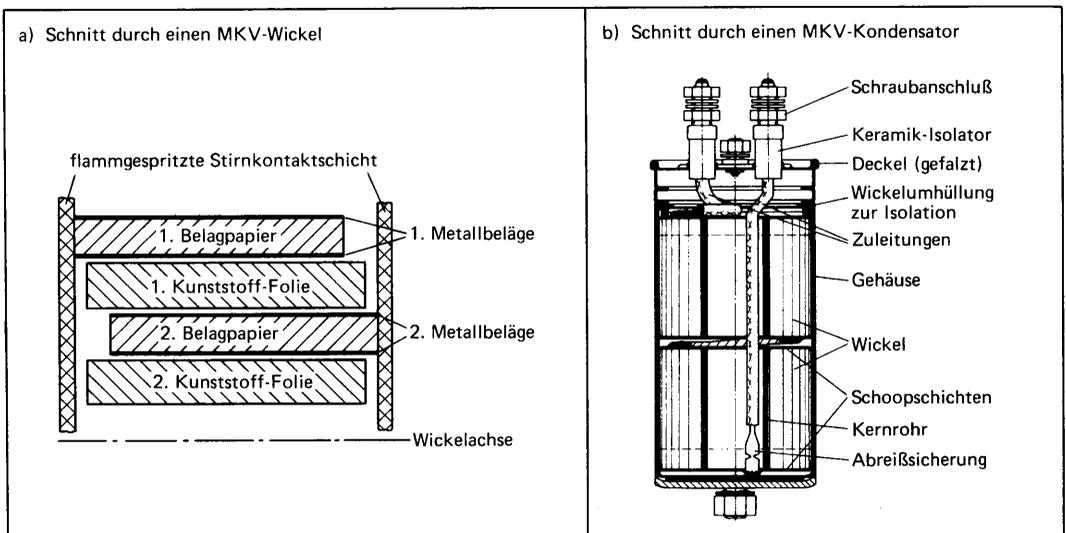


Bild 2-34. MKV-Kondensator: a) Schnitt durch den Wickel, b) Schnitt durch den Kondensator.

Der MKV-Kondensator weist folgende Vorteile auf:

- niedrige Verluste im Dielektrikum,
- höhere Spannungsfestigkeit durch Imprägnierung,
- hohe Kapazitätsstabilität durch Imprägnierung,
- hohe Spitzenstrom-Belastbarkeit, da Papier als Träger von zwei Metallbelägen die Kontaktierung verbessert.

Nachteilig ist seine Empfindlichkeit gegenüber Temperaturwechseln. Der MKV-Kondensator ist geeignet für Nennspannungen bis etwa 3 kV (durch Serienschaltung von Wickeln oder in den Wickeln) und für erhöhte Anforderungen.

2.3.3 Elektrolyt-Kondensatoren

Jeder Kondensator besteht aus zwei elektrisch leitfähigen Elektroden (Belägen), die durch ein dazwischenliegendes *Dielektrikum* voneinander isoliert werden. Einen Kondensator, dessen Belag von einem *Elektrolyten* anstelle einer metallischen Elektrode gebildet wird, bezeichnet man als *Elektrolyt-Kondensator* oder auch kurz als *Elko*.

Der Elko ist in der Regel gepolt. Ein elektrisch leitfähiges Material, der Elektrolyt, bildet die negative Elektrode, *Kathode* genannt. Der Elektrolyt besteht aus Salzen, die in organischen oder anorganischen Flüssigkeiten gelöst sind und eine geringe Menge Wasser ($\leq 2\%$) enthalten. Die von dem Elektrolyten gebildete Kathode wird mit dem gleichen Metall kontaktiert, aus dem die Anode besteht.

Die positive Elektrode eines Elko (*Anode*) besteht aus einem sogenannten *Ventilmittel*. Die Oxide von Ventilmitteln sperren den Strom in einer Richtung, lassen ihn aber in der anderen Richtung durch. Technisch genutzt werden die Metalle Aluminium und Tantal, deren Oxide Aluminiumoxid (Al_2O_3) oder Tantalpentoxid (Ta_2O_5) das Dielektrikum des Elko bilden (Tabelle 2-6).

Aluminium- und Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren stellt man sowohl mit festem als auch mit flüssigem Elektrolyten her; man spricht deshalb auch von *flüssigen* und *trockenen* Elektrolyt-Kondensatoren. Der Elko mit *flüssigem* Elektrolyten ist *selbstheilend*, denn Störstellen im Dielektrikum werden bei angelegter Gleichspannung anodisch oxidiert. Hierzu ist der im Wasser chemisch gebundene Sauerstoff notwendig und der Reststrom I_R unvermeidlich.

Tabelle 2-6. Bestandteile von Elektrolyt-Kondensatoren.

Ventilmittel:	Aluminium	Tantal	
Dielektrikum:	Al_2O_3	Ta_2O_5	
Elektrolyt:	naß	Salzlösung	Schwefelsäure
	trocken	Mangandioxid	

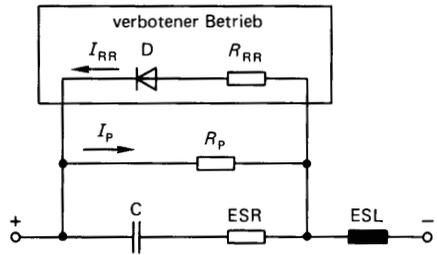


Bild 2-35. Ersatzschaltung eines Elko.

Im Bild 2-35 ist das Ersatzschaltbild von Elektrolyt-Kondensatoren dargestellt. Der ohmsche Anteil der Ersatzschaltung hat die Bezeichnung *ESR* (Equivalent Series Resistor). Der Parallelwiderstand R_P , der den Reststrom bei richtiger Polung darstellt, ist zusätzlich noch von der Spannung und von der Temperatur abhängig. Durch eine Falschpolung, hier als verbotener Betrieb gekennzeichnet, fließt der Inversstrom I_{IR} über die vom Ventilmittel gebildete Diode *D* und kann durch Bildung von Knallgas zu einer Explosion des Kondensators führen. Beim Elko mit flüssigem Elektrolyten ist die Kapazität *C* und der *ESR* von der Frequenz und von der Temperatur abhängig. Nur die äquivalente Serieninduktivität *ESL* (Equivalent Series inductor *L*) ist konstant. Dieser Zusammenhang ist im Bild 2-36 dargestellt.

Der *ESR*, der Verlustfaktor $\tan \delta$ und die Kapazität *C* hängen wie folgt zusammen

$$ESR = \frac{\tan \delta}{2\pi f C} \tag{2-29}$$

Der Elko ist ein recht preisgünstiges Bauelement, das eine sehr große Volumenkapazität besitzt. Abgesehen von Spezialtypen, bei denen beide Beläge eine große Oberfläche besitzen, beispielsweise bei Kondensatoren für Lautspre-

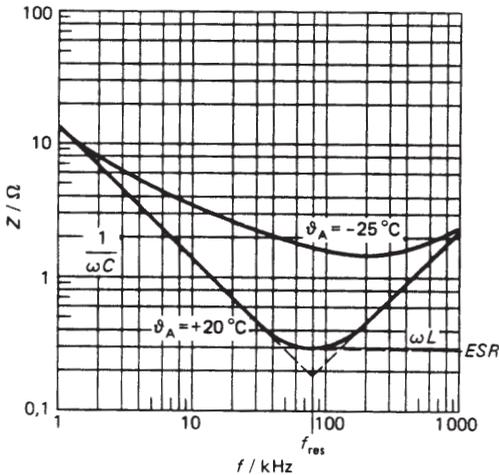


Bild 2-36. Idealisierter Scheinwiderstand Z eines Elko in Abhängigkeit von der Frequenz f .

cherweichen und zum Motoranlauf, ist der Elko nur für Gleichspannung geeignet.

Nasse Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren

Der Aluminium-Elektrolyt-Kondensator mit flüssigem Elektrolyten, nachfolgend *Al-Elko* genannt, findet am häufigsten Verwendung. Den Al-Elko stellt man für Spannungen $U_N \leq 450$ V und mit Kapazitätswerten bis zu $C_N \leq 220$ mF her. Seine Hauptbestandteile sind zwei Aluminiumfolien und mit Elektrolyt getränktes Fließpapier, die zu einem Wickel aufgerollt sind. Flüssige oder pastöse Elektrolyte werden durch

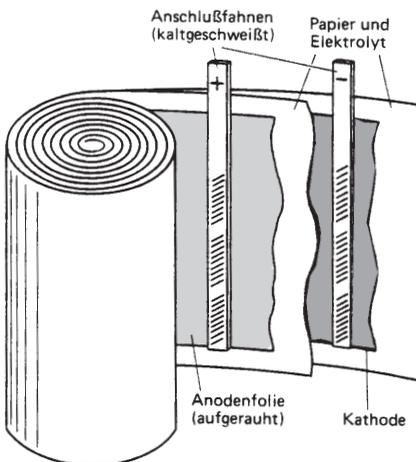


Bild 2-37. Aufbau der Wicklung eines Al-Elko.

Fließpapier (Separator) fixiert, wodurch meistens ein von der Lage unabhängiger Einbau des Elko möglich ist und die beiden Folien gegeneinander isoliert werden (Bild 2-37).

Um die wirksame Oberfläche der Aluminiumfolie, welche die Kathode bildet, stark zu vergrößern, erhält diese durch Ätzen eine schwammartige Oberflächenstruktur. Die das Dielektrikum bildende Oxidschicht Al_2O_3 erzeugt man anschließend durch *anodische Oxidation (Formierung)*. Diese Oxidschicht braucht nur sehr dünn zu sein ($1,2 \text{ nm/V} \leq d \leq 2,2 \text{ nm/V}$). Durch die große Oberfläche, die dünne Oxidschicht und die *Permittivitätszahl* ϵ_r (9,5 für Al_2O_3) realisiert man große Kapazitätswerte bei kleinem Volumen. Man spricht von einer großen Volumenkapazität.

Der Betriebstemperaturbereich des Al-Elko ist durch das Elektrolytssystem und die Abdichtung seines Gehäuses festgelegt. Die Gehäusetemperatur und die Wechselstrombelastung eines Al-Elko bestimmen maßgeblich dessen *Brauchbarkeitsdauer*. In modernen Elektrolytkondensatoren finden die in Tabelle 2-7 aufgeführten Elektrolyte Verwendung:

Tabelle 2-7. Elektrolyte für den Al-Elko.

Substanz	obere Grenztemperatur
Dimethylformamid (DMF)	85 °C (105 °C)
Dimethylamid (DMA)	85 °C (105 °C)
Dimethylacetamid (DMAC)	85 °C
Gamma-Butyrolakton (BGL)	105 °C
Butyrolakton	125 °C

Diese Elektrolyte sind chemisch sehr stabil. Mit ihnen sind gute elektrische Werte, wie z. B. niedrige Impedanz, kleine Restströme und ein gutes Langzeitverhalten, zu erreichen. Den guten elektrischen Eigenschaften steht eine problematische Entsorgung entgegen.

Nach der Rahmenspezifikation DIN IEC 384-4/CECC30300 stellt man an den Al-Elko entsprechende des Anwendungsbereiches unterschiedliche Anforderungen. Typen für erhöhte Anforderungen werden mit *Long Life grade (LL)* oder

Typ I) bezeichnet. Für allgemeine Anwendungen gibt es die *General Purpose*-Typen (GP oder Typ II).

Den Al-Elko setzt man hauptsächlich zur Siebung ein, vor allem in Stromversorgungen. Dazu wird er mit Gleichspannung betrieben, der ein Wechselstrom I_w überlagert ist.

Für die Dimensionierung in der Praxis ist zu beachten, daß die wichtigen Parameter, wie der Ersatz-Serien-Widerstand ESR , die Kapazität C und damit die Impedanz Z von der Frequenz und von der Temperatur abhängig sind. Bedeutend ist vor allem die sehr starke Zunahme des ESR bei tiefen Temperaturen, die erheblich unter dem Gefrierpunkt liegen (-20°C). Hier friert der Elektrolyt allmählich ein und wird hochohmig.

Die Wechselstrom-Belastbarkeit wird bei niedrigen Frequenzen durch die maximal zulässige Spannung, die am Kondensator anliegen darf, begrenzt. Jede auch nur kurzzeitige Verpolung des Kondensators ist wegen der Zersetzung des Elektrolyten zu Gas und der damit verbundenen Explosionsgefahr unbedingt zu vermeiden. Bei hohen Frequenzen bestimmt die vom Wechselstrom am ESR verursachte Erwärmung $P_{\max} = I_w^2 ESR_{\max}$ die Strombelastbarkeit des Elko. Der in den Datenblättern angegebene Nennwert der Wechselstrombelastung I_w darf ausgenutzt werden, solange die Umgebungstemperatur T_A des Kondensators die sogenannte obere *Kategorietemperatur* T_{OK} nicht übersteigt.

Als Kategorietemperatur bezeichnet man die Temperatur, auf die sich die spezifizierte Brauchbarkeitsdauer, beispielsweise 3000 Stunden für einen GP-Typ und 10000 Stunden für einen LL-Typ, des Kondensators bezieht. Üblich sind die Kategorietemperaturen 85°C , 105°C und 125°C . Abgesehen von dem Bereich der Frühausfälle ist die Ausfallrate λ während der Brauchbarkeitsdauer konstant.

Hersteller geben für sogenannte LL-Typen Ausfallraten λ zwischen $2 \text{ fit} \leq \lambda \leq 20 \text{ fit an}$, während die GP-Typen ein λ von 50 fit erreichen. Bei der in den Datenblättern angegebenen Belastung für die *Bezugszuverlässigkeit* darf die Übertemperatur des Kondensatorbeckens um 3 K, manche Hersteller geben auch 5 K an, ansteigen. Wird der Kondensator mit den für die *Bezugszuverlässigkeit* angegebenen Werten be-

lastet, dann ist seine Brauchbarkeitsdauer gleich der Bezugszuverlässigkeit.

Die Angaben in den Datenblättern beziehen sich in der Regel auf eine Meßfrequenz von 100 Hz und eine Temperatur von 20°C . Für höhere Frequenzen und abweichende Temperaturen gibt man Korrekturwerte an. Mit der Wahl von Frequenzen $f > 100 \text{ Hz}$ und vor allem von kleineren Strömen kann man die Brauchbarkeitsdauer wesentlich vergrößern. Die angelegte Betriebsspannung hat, entgegen früheren Angaben, bei neueren Elko-Typen mit den in der Tabelle 2-8 genannten Elektrolyten einen nur unwesentlichen Einfluß auf die Brauchbarkeitsdauer. Typisch für den nassen Al-Elko sind Änderungsausfälle, die durch das Austrocknen des Elektrolyten und das dadurch verursachte Driften seiner Kennwerte C , Z , I_R und $\tan \delta$ verursacht werden.

Verwendet man den Elko in zeitbestimmenden Schaltungen, so sind folgende Effekte zu berücksichtigen: Der stark von der Temperatur und der Spannung abhängige Reststrom ρ kann durch einen Widerstand parallel zur Kapazität dargestellt werden. Der über die Ladungsmenge mit einer Gleichspannung ermittelte Kapazitätswert heißt *Gleichspannungskapazität* C_G und kann deutlich über der *Wechselspannungskapazität* C_w liegen ($C_G \leq 1,5 C_w$).

Stehende Bauformen des Elko sind vorteilhafter als axiale Typen, die liegend eingebaut werden. Die auf der Leiterplatte beanspruchte Fläche ist klein. Da die Anschlußstifte nahe beieinander liegen, läßt sich das Layout für die Elko-Anschlüsse so gestalten, daß diese eine sehr kleine Leiterschleife bilden. Hierdurch kann der Kondensator-Wechselstrom nur kleine hochfrequente Magnetfelder erzeugen (Abschn. 17.6.3).

Trockene Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren

Diese Kondensatoren sind ähnlich aufgebaut wie solche mit nassem Elektrolyten. Der mit Glasfasergewebe fixierte Elektrolyt besteht aus Mangandioxid (MnO_2), das auch Braunstein genannt wird. Trockene Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren, vom Hersteller *SAL-Kondensator* (SAL = Solid Aluminium) genannt, sind nur für erhöhte Anforderungen und mit einem Nennspannungsbereich $U_N \leq 40 \text{ V}$ im Einsatz.

SAL-Kondensatoren kann man in niederohmigen Kreisen betreiben. Sie sind für Wechsel-

strombelastung gut geeignet. Selbst eine Verpolung mit einer Spannung von $0,3 U_N$ ist zulässig. SAL-Kondensatoren haben im Vergleich zum nassen Elko sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Betriebstemperaturen hervorragende Eigenschaften.

Da der feste Elektrolyt nicht austrocknen kann, ist ein Beginn von Verschleißausfällen nicht bekannt, so daß deren Ausfallrate λ konstant klein ($10^{-8} \leq \lambda \leq 10^{-9}$) bleibt und die Brauchbarkeitsdauer nahezu unbegrenzt ist. Wegen ihrer hohen Zuverlässigkeit finden trockene Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren auch in der Raumfahrt Verwendung.

Trockene Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren

Trockene Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren haben eine sehr hohe Volumenkapazität und heißen im Sprachgebrauch nur Tantal-Kondensatoren. Ihre Anode besteht aus einem mit Tantal-Pulver hergestellten Sinterkörper. Tantal-Kondensatoren stellt man mit Nennspannungen $U_N \leq 50$ V, mit hermetisch dichtem Gehäuse bis $U_N \leq 75$ V und mit Kapazitätswerten bis zu $330 \mu\text{F}$ her. Trockene Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren sind prinzipiell *nicht* für niederohmige Kreise, etwa zum Abblocken von Versorgungsspannungen geeignet, da diese einen Vorwiderstand von $3 \Omega/\text{V}$ benötigen, um zuverlässig zu arbeiten. Ihr niedriger Reststrom ist für zeitbestimmende Kreise vorteilhaft.

Nasse Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren

Nasse Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren setzt man wegen ihres sehr hohen Preises nur in Geräten mit extremen Anforderungen an die Zuverlässigkeit, wie beispielsweise in der Raumfahrt, ein. Es gibt nasse Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren als Typen mit geätzter Anodenfolie und solche mit gesintertem Tantal (engl.: wet slug). Die Nennspannung reicht bis zu $U_N = 125$ V bei Kapazitätswerten von $C \leq 56 \mu\text{F}$.

2.3.4 Keramik-Kondensatoren

2.3.4.1 Werkstoffe und Einteilung

Bei diesen Kondensatoren besteht das Dielektrikum aus einer Keramik, d. h. einer anorganischen, nicht metallischen, polykristallinen Substanz, die durch einen Brennprozeß bei hohen Temperaturen (1200°C bis 1400°C) entsteht.

Für die Kondensatorkeramik kommt meist Titandioxid (TiO_2) mit einer Permittivitätszahl ϵ_r von etwa 100 zum Einsatz. Durch Verwendung anderer Oxide (vor allem BaO im Verhältnis 1:1) kann man die Permittivitätszahl wesentlich steigern. Sie beträgt für die ferroelektrische Substanz Bariummetatitanat (BaTiO_3) bis zu 10000.

2.3.4.2 Eigenschaften

Die Keramik-Kondensatoren teilt man in IEC 384-9/CECC 30600 und 30700 sowie in DIN 45910 – je nach dielektrischem Werkstoff – in drei Klassen ein. Die einzelnen Keramikwerkstoffe, die zugehörigen Kennwerte, die sonstigen Eigenschaften sowie die bevorzugten Einsatzgebiete der verschiedenen Klassen nach DIN 45910 sind in Tabelle 2-8 vergleichend gegenübergestellt.

Es sei darauf hingewiesen, daß viele dieser genannten Kenngrößen von Umgebungseinflüssen, beispielsweise von der Temperatur oder der Spannung abhängen. Die Diagramme für die Kapazitätsänderung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur oder der Betriebsspannung zeigt Bild 2-38. Die anderen Abhängigkeiten sind den Datenblättern zu entnehmen.

Deutlich erkennbar in Bild 2-38 ist beispielsweise der völlig unterschiedliche Verlauf der Kapazitätsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur innerhalb derselben Klasse 2, zum einen für die Keramikart X7R und zum andern für die Keramikart Z5U.

2.3.4.3 Bauformen

Einschicht-Kondensator (Klasse 1 und 2)

Der Einschicht-Kondensator besteht aus einem dünnen Keramikplättchen mit beidseitig aufgetragenen Kupfer-Belägen, an die Anschlußdrähte angelötet sind. Die im Tauchverfahren aufgetragene Epoxidharz-Umhüllung verleiht dem Kondensator große mechanische Festigkeit, einen guten Feuchteschutz und ist widerstandsfähig gegen alle verwendeten Lösungsmittel. Bild 2-39 zeigt einen Einschichtkondensator im Schnitt und schematisch.

Für den Einbau sind die Vorschriften über die mindestens einzuhaltende Länge der Anschlußdrähte (markiert durch Stauchteller oder Sicke) sowie die Lötparameter (Löttemperatur maxi-

Tabelle 2-8. Eigenschaften und Anwendungen von Keramik-Kondensatoren der verschiedenen Klassen.

Eigen- schaften \ Klasse	Klasse 1 (NDK: Niedrige Permittivität)	Klasse 2 (HDK: Hohe Permittivität)		Klasse 3 (Sperrschicht)
Keramik- Werkstoff	TiO ₂ (mit BaOP, La ₂ O ₃ , Nd ₂ O ₅)	ferroelektrisches BaTiO ₃		ferroelektrisches BaTiO ₃ mit Halbleitersperr- schichten
Permittivitäts- zahl ϵ_r	13 bis 470	10 ³ bis 10 ⁴		bis 50 · 10 ⁴
Verlustfaktor $\tan \delta$	< 1,5 · 10 ⁻³	< 30 · 10 ⁻³		≤ 60 · 10 ⁻³
Keramikart	COG	X7R	Z5U	
Temperatur- koeffizient $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	konstant (0 ± 30)	groß	sehr groß	nicht konstant
Alterung	keine	-2%	-5%	2%
		je log. Zeitdekade		je log. Zeitdekade
Sonstige Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ● Kapazitätsänderung linear von der Temperatur abhängig ● Kapazität und Verlustfaktor nicht spannungsabhängig ● hoher Isolationswiderstand ● niedrige dielektrische Verluste (bis in den UHF-Bereich) ● enge Kapazitätstoleranzen ● keine Alterung 	<ul style="list-style-type: none"> ● Kapazitätsänderung nichtlinear von Temperatur und Spannung abhängig ● hoher Isolationswiderstand bei Gleichstrom ● große Kapazitätswerte bei kleinen Abmessungen ● Abnahme der Permittivität bei höheren Frequenzen, bei Alterung 	<ul style="list-style-type: none"> ● geringer Isolationswiderstand ● kleine Nennspannung (max. 100 V) ● höchste Kapazitätswerte pro Volumen ● hoher Verlustfaktor 	
Einsatzgebiete	Schwingkreis Filterschaltung Meßverstärker Zeitglied Kopplung und Siebung (besonders bei HF)	Kopplung Entkopplung (Sieben, Abblocken) Funkentstörung bei kleinen Spannungen		Stützkondensator sonst wie Klasse 2, aber geringere Ansprüche an Kapazi- tätskonstanz NF-Anwendungen

mal 270 °C, Lötdauer maximal 10 s) einzuhalten.

Vielschicht-Kondensator (Klasse 1 und 2)

Keramische Vielschicht-Kondensatoren bestehen aus kammartig ineinandergreifenden Elektroden, die in einem monolithischen Keramik-

block eingesintert sind. Die seitlich zueinander versetzten Elektroden werden von den Stirnseiten herausgeführt und dort kontaktiert. Die so hergestellten Vielschicht-Kondensatoren sind für konventionelle Bestückung radial bedrahtet. In CHIP-Ausführung kann man diese Bauform als SMD direkt auf die Platine löten. Bild 2-40 a zeigt den Aufbau eines CHIP-Kondensa-

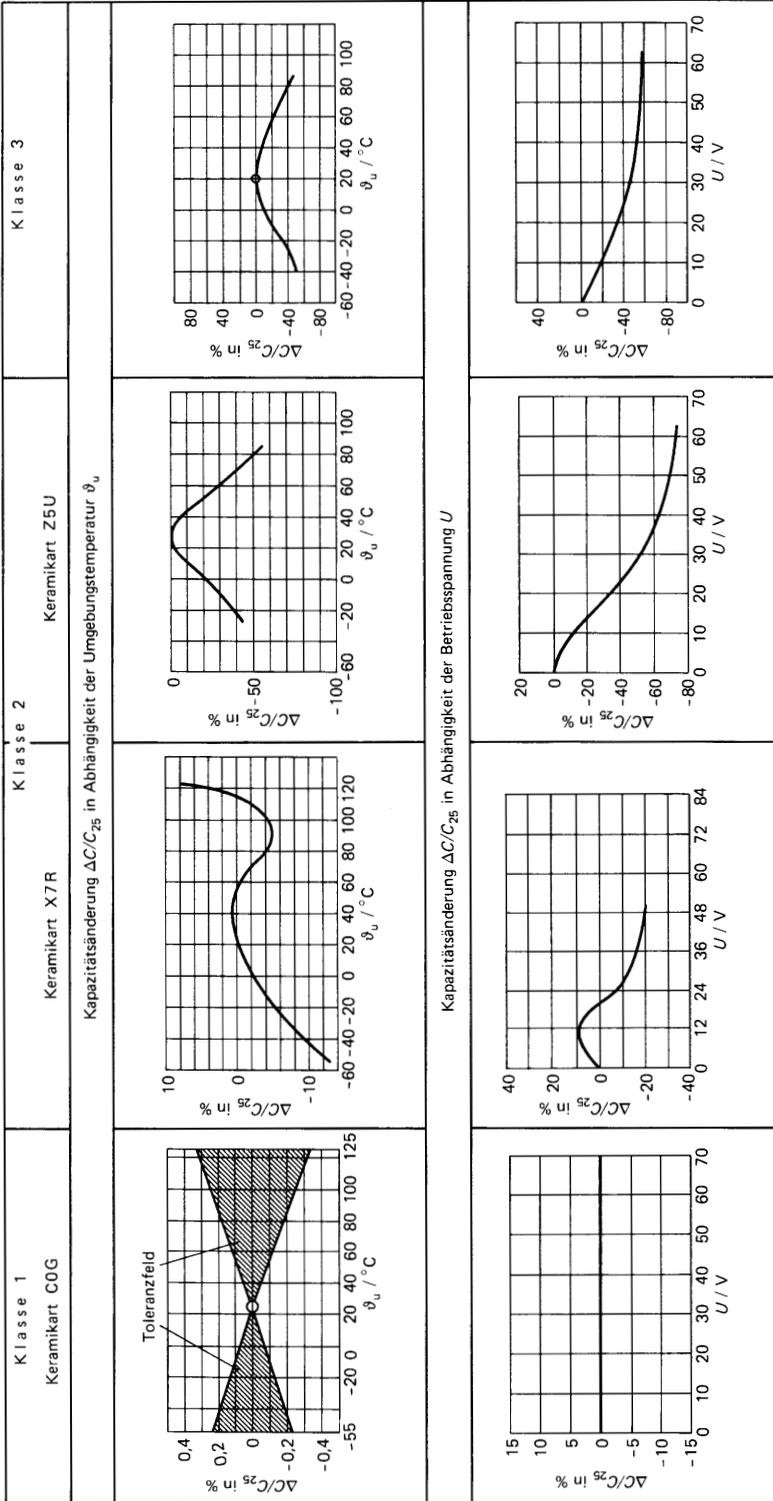


Bild 2-38. Kapazitätsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Betriebsspannung für verschiedene Klassen Keramik-Kondensatoren.
 Werkbild: Siemens

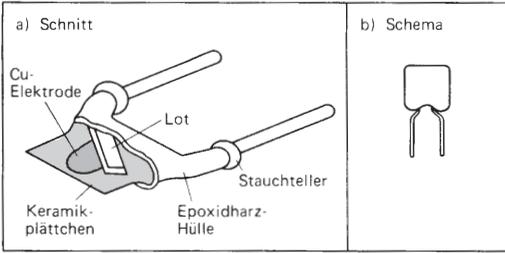


Bild 2-39. Einschichtkondensator.

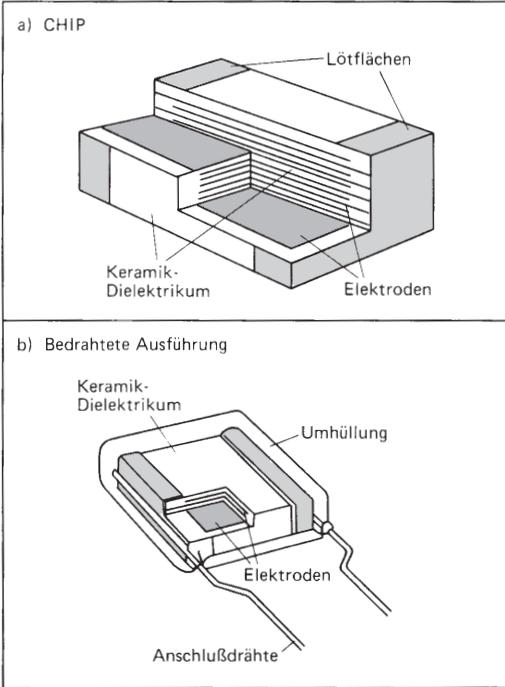


Bild 2-40. Schematischer Aufbau eines Vielschicht-Kondensators: a) CHIP, b) bedrahtete Ausführung.

tors und Bild 2-40 b den Aufbau eines bedrahteten Vielschicht-Kondensators.

Oberhalb der Kapazität von 27 nF nimmt die Zuverlässigkeit der Vielschicht-Kondensatoren stark ab, so daß es ratsam ist, Folien-Kondensatoren zu verwenden.

Sperrschicht-Kondensator (Klasse 3)

Die Forderung nach hoher Kapazität pro Volumen oder Oberfläche führte zur Entwicklung des keramischen Sperrschicht-Kondensators (Bild 2-41).

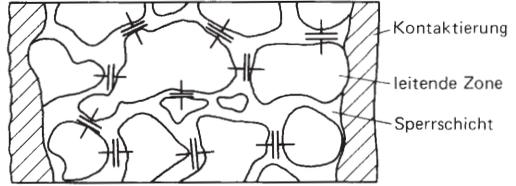


Bild 2-41. Aufbau eines keramischen Sperrschicht-Kondensators.

Er besteht vorwiegend aus Barium- oder Strontiumtitanat. Durch chemische Reduktion wird die Keramik leitfähig gemacht. Dann bildet sich durch oberflächliche Oxidation eine sehr dünne Dielektrizitätsschicht, die *Sperrschicht*. Zwei Arten Sperrschichtkondensatoren sind zu unterscheiden: Bei der ersten befindet sich die Sperrschicht direkt an der Oberfläche der Keramik, d.h. unter den Metallelektroden. Die Sperrschicht wird beim zweiten Typ an den Korngrenzen der Keramik erzeugt. Dadurch gibt es innerhalb der Keramik viele Miniaturkondensatoren, die in Reihe oder parallel geschaltet sind und nach außen wie eine große Kapazität wirken. Durch diesen Aufbau ist bei gleicher Dicke d und Fläche A die Kapazität etwa fünfmal höher. Die Sperrschichtkondensatoren weisen folgende Besonderheiten auf:

- große Werte für das Verhältnis Kapazität/Volumen,
- niedriger Isolationswiderstand,
- großer Verlustfaktor,
- große Frequenzabhängigkeit.

2.3.5 Einstellbare Kondensatoren

Veränderbare Kapazitäten sind beispielsweise notwendig, um in der Nachrichtentechnik die Empfänger abzustimmen oder den frequenzunabhängigen Spannungsteiler am Y-Eingang eines Oszilloskops abzugleichen. In Bild 2-28 ist der *Drehkondensator* zu sehen, dessen parallel geschaltete Platten ineinandergreifen (die maximale Kapazität ist 500 pF). Die früher besonders in Rundfunkgeräten weit verbreiteten Drehkondensatoren werden heute durch Kapazitätsdioden ersetzt, die elektrisch steuerbar und billig herzustellen sind.

Trimm-Kondensatoren (Bild 2-28) dienen zum Feinabgleich der Kapazität und sind nur mit einem Werkzeug einzustellen. Außer Luft dient auch Keramik und Kunststoffolie als Dielektrikum (ergibt besonders bei hohen Frequenzen größere Verluste).