

INGENIEUR. FERNSTUDIUM

Pauer

Bauelemente der Informations- elektrik I 4

Herausgeber:

Ingenieurhochschule
Mittweida

200.40-04

LEHRWERK
für das Ingenieur-Fernstudium

Ingenieur Heinz Pauer

BAUELEMENTE
DER
INFORMATIONEN -
ELEKTRIK I

4

- Kondensatoren -

Veröffentlicht:
INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
KARL-MARX-STADT

Lektoren:

1. Fachlektor: Dipl.Phys. Bernhard Geigerhilk
VEB Kondensatorenwerk Gera
2. Fachlektor: Ingenieur Günter Jordan
VEB Fernmeldewerk Leipzig
- Deutschlektor: Fachschuldozent Arthur Gärtner
Lauenhain bei Mittweida
- Bearbeitung: Ingenieurhochschule Mittweida
Lehrbriefentwicklung

Redaktionsschluß: September 1969

Katalognummer: 200.40 - 04

Inhaltsverzeichnis

1.	Kondensatoren	1
1.0.	Vorbetrachtungen	1
1.0.1.	Kapazität und Toleranz der Kondensatoren	1
1.0.2.	Spannungen am Kondensator	3
1.0.3.	Dielektrizitätskonstante	4
1.0.4.	Verlustfaktor - Güte	6
1.0.5.	Isolationswiderstand - Zeitkonstante	16
1.0.6.	Verlustleistung bei Kondensatoren	19
1.0.7.	Temperatur- und Frequenzgang	23
1.0.8.	Kontaktsicherheit und Dämpfungsarmut	26
1.0.9.	Alterung	33
1.0.10.	Prüfklassen der Kondensatoren	35
1.1.	Papierkondensatoren	36
1.1.1.	Aufbau und Herstellung	36
1.1.2.	Ausführungsformen - Elektrische Werte - Anwendung	38
1.2.	Metallpapier-Kondensatoren	57
1.2.1.	Aufbau und Herstellung	57
1.2.2.	Regenerierfähigkeit	60
1.2.3.	Ausführungsformen - Elektrische Werte - Anwendung	63
1.3.	Lack-Kondensatoren	67
1.3.1.	Aufbau und Herstellung	67
1.3.2.	Ausführungsformen - Elektrische Werte - Anwendung	68
1.4.	Wiederholungsfragen zu den Abschnitten 1.0. - 1.3.2.	70
1.5.	Übungsaufgaben zu den Abschnitten 1.0. - 1.3.2.	71
1.6.	Antworten auf die Wiederholungsfragen im Abschnitt 1.4.	73
1.7.	Lösungen der Übungsaufgaben im Abschnitt 1.5.	76

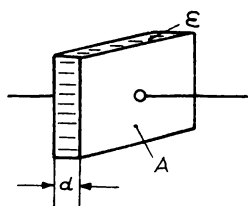
1. Kondensatoren

1.0. Vorbetrachtungen

An den Anfang der Abhandlung über Kondensatoren sollen einige allgemeingültige Betrachtungen gestellt werden. Anliegen der Lehrbriefreihe ist es, technische Bauelemente darzustellen und zu behandeln. Es sollen hier keineswegs theoretische Untersuchungen angestellt werden, die in den Rahmen des Faches Grundlagen der Elektrotechnik fallen. Dennoch gibt es einige Begriffe und Effekte, die für alle Kondensatorenarten von grundsätzlicher Bedeutung sind. Diese sollen hier aufgezeigt und kurz umrissen werden.

1.0.1. Kapazität und Toleranz der Kondensatoren

Kondensatoren sind Bauelemente, deren Schaltungsgröße die Kapazität ist. Die wohl einfachste Form der Kondensatoren ist der Plattenkondensator.



A = Elektrodenfläche
 d = Elektrodenabstand
 ϵ = Dielektrizitätskonstante

Bild 0.1 Plattenkondensator

Im folgenden werden notwendige Betrachtungen auf den Fall des Plattenkondensators zurückgeführt. Die Kapazität eines Kondensators ist abhängig von seinen geometrischen Abmessungen und vom verwendeten Dielektrikum. Legt man an die Elektroden eines Kondensators eine elektrische Spannung, so bildet sich auf ihnen eine elektrische Ladung, wobei die Ladungsmenge streng proportional der angelegten Spannung ist. Aus dieser Kenntnis heraus folgt die Definitionsgleichung für die Kapazität:

$$Q = C \cdot U \quad \text{Definitionsgleichung der Kapazität}$$

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß einige Dielektrika eine spannungsabhängige Dielektrizitätskonstante besitzen, so daß eine strenge Proportionalität zwischen Q und U nicht mehr vorliegt. Der Proportionalitätsfaktor C wird als Kapazität des Kondensators bezeichnet. Die Kapazität wird vielfach als das Fassungsvermögen des Kondensators erklärt, Fassungsvermögen für Ladungsmengen. Hier soll kurz der Charakter der Kapazität untersucht werden.

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{J \cdot t}{U} = \frac{\text{Strömungsgröße}}{\text{Spannungsgröße}} \hat{=} \text{Leitwertcharakter}$$

Leitwerte und Widerstände gehören zu den Grundgrößen in der Elektrotechnik und sind nach besonderen Regeln zu behandeln. So werden beispielsweise in Parallelschaltungen Leitwerte addiert. Da nun die Kapazität Leitwertcharakter besitzt, erkennt man daraus sofort, daß parallelgeschaltete Kapazitäten zu addieren sind, was allgemein bekannt ist.

Die Einheit der Kapazität findet man aus der Definitionsgleichung:

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{1 \text{ As}}{1 \text{ V}} = 1 \text{ s} = 1 \text{ F (Farad)}.$$

Das Spektrum der technischen Kapazitätswerte reicht etwa von $(10^{-12} \text{ --- } 10^{-2}) \text{ F}$.

Bei der Fertigung von Kondensatoren, wie bei der Fertigung beliebiger Bauelemente, treten Abweichungen vom vorgesehenen Endwert auf. Eine toleranzfreie Fertigung ist bekanntlich nicht möglich. Für jede Kondensatorenart liegen die Toleranzwerte in spezifischen Bereichen, eine allgemeine Angabe ist aus diesem Grund nicht möglich. Da die Toleranz für den jeweiligen Verwendungszweck eine große Bedeutung besitzt, muß man immer die entsprechenden Standards oder die technischen Unterlagen der Hersteller einsehen. Grundsätzlich kann man feststellen, daß es gelingt, engere Toleranzen zu realisieren, wenn die Kondensatoren größer werden, wobei sich "größer" sowohl auf die elektrischen Daten als auch auf die geometrischen Abmessungen bezieht. Jedoch hat man die Toleranz nicht

nur als eine Abweichung vom Nennwert schlechthin zu sehen, sondern es kommt ihr auch eine ökonomische Bedeutung zu.

Für alle technischen Anwendungen muß man die Toleranzen so grob wie möglich ansetzen, denn Bauelemente mit weiten Toleranzen sind am billigsten. Es gelingt, Toleranzen von $\pm 20\%$ gezielt herzustellen; eine Ausnahme mit höheren Toleranzen bilden allerdings Elektrolyt-Kondensatoren. Kleinere Werte bedingen erhöhten technologischen Aufwand bei der Herstellung, oder sie müssen aus der durchgehenden Fertigung aussortiert werden, was sich auf jeden Fall im Preis auswirkt.

1.0.2. Spannungen am Kondensator

Für das Betreiben eines Kondensators ist zunächst die Nennspannung zu beachten. Unter Nennspannung versteht man die Spannung, die maximal im Dauerbetrieb am Kondensator anstehen darf. Allerdings muß man jeweils die Kondensatortemperatur berücksichtigen. Bis zu 40°C ist im allgemeinen der Betrieb mit Nennspannung zulässig, darüber hinaus hat man sich nach der sogenannten Dauergrenzspannung für verschiedene Kondensatortypen zu orientieren. Die Festlegung der Dauergrenzspannung kann unterschiedlich sein, so daß man jeweilig die technischen Unterlagen einsehen muß. Für einige Kondensatorenarten ist trotz Angabe einer Nenngleichspannung der Betrieb bei Wechselspannungen zulässig. Im allgemeinen ist hier an Sinusspannungen gedacht; man beachte die angegebenen Werte für Frequenz und Effektivwerte der Spannung.

Ist die Kondensatorspannung eine mit Wechselspannung überlagerte Gleichspannung, so darf die Summe von Gleichspannung und Spitzenwert der Wechselspannung die angegebene Nennspannung nicht überschreiten. Für verschiedene Arten von Kondensatoren ist ein Überschreiten der Nennspannung um einen bestimmten Betrag für eine gewisse Zeit zulässig. Hierzu sind die Festlegungen der Hersteller genau zu beachten. Auf jeden Fall handelt es sich immer nur um kurzzeitige Überschreitungen, da die im Kondensator umgesetzte Verlustleistung dem Quadrat der Spannung proportional ist, was nachfolgend noch ausführlich erläutert wird.

Wenden wir uns kurz dem Begriff der Prüfspannung zu. Um mit einiger Sicherheit den Betrieb bei Nennspannung garantieren zu können, werden alle Kondensatoren geprüft, und zwar mit einer bestimmten Überspannung. Allgemein gilt für die Prüfspannung:

$$U_P = k \cdot U_N \quad \text{Prüfspannung für Kondensatoren.}$$

Der Faktor k ist eine Konstante, die für jede Kondensatortype unterschiedlich sein kann; sie richtet sich danach, welche Belastung einem Dielektrikum zugemutet werden kann. Oben wurde bereits festgestellt, daß Überspannungen nur für kurze Zeiten an den Kondensatoren anstehen dürfen. Für den Prüfvorgang folgt daraus, daß die Prüfung zeitlich begrenzt sein muß; es sind also in jedem Fall die Prüfzeiten genau einzuhalten, sonst führt die Prüfung zur Zerstörung des Kondensators.

Im Zusammenhang mit Bauelementen findet man häufig den Ausdruck Betriebsspannung, wo man besser Nennspannung sagen sollte. Der Eindeutigkeit wegen halten wir fest: Betriebsspannung ist die Spannung, bei welcher der Kondensator gerade betrieben wird. Was Nennspannung ist, wurde bereits festgelegt. Im allgemeinen gilt die Beziehung:

$$U_B \leq U_N \quad \text{Beziehung zwischen Betriebs- und Nennspannung}$$

Vielfach ist es unkritisch, einen Kondensator weit unterhalb seiner Nennspannung zu betreiben, die Lebensdauererwartung nimmt fast stets zu, ein Überschreiten der Nennspannung jedoch ist, zumindest für den Dauerbetrieb, nicht zulässig. Bei Kondensatoren treten gelegentlich noch andere Spannungsbegriffe auf, die jedoch speziellen Charakter haben und hier nicht behandelt werden sollen.

1.0.3. Dielektrizitätskonstante

Will man einen Stoff als Dielektrikum verwenden, so stellt man an seine physikalischen Eigenschaften eine Reihe bestimmter Forderungen. Unter anderem wünscht man im allgemeinen eine hohe Dielektrizitätskonstante (DK). Im folgenden soll eine anschau-

liche Vorstellung von der Dielektrizitätskonstanten entwickelt werden, was für den Praktiker immer von besonderem Vorteil ist.

$$D = \epsilon \cdot E \quad \text{Definitionsgleichung für die Dielektrizitätskonstante}$$

$\epsilon = \frac{D}{E}$ Aus dieser Gleichung erkennt man, daß die Dielektrizitätskonstante ebenso wie die Kapazität eine Leitwertgröße ist, da sie einem Quotienten Strömungsgröße durch Spannungsgröße entspricht. Mithin stellt also die Dielektrizitätskonstante nichts anderes als ein Maß für die Leitfähigkeit des Dielektrikums gegenüber Verschiebungslinien dar. Die Kapazität ist der Dielektrizitätskonstanten direkt proportional.

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad \text{Kapazität des Plattenkondensators}$$

Bekanntlich ergibt sich die sogenannte absolute Dielektrizitätskonstante als Produkt aus der Dielektrizitätskonstanten für das Vakuum und einer Relativzahl.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad \text{Absolute Dielektrizitätskonstante}$$

$$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \quad \text{DK für Vakuum}$$

$$\epsilon_r = \text{relative DK, Materialkenngröße}$$

Für den allgemeinen Überblick genügt es, wenn man eine Größenvorstellung zur relativen Dielektrizitätskonstanten besitzt. Die uns bekannten Stoffe kann man bezüglich der Dielektrizitätskonstanten in drei Gruppen einteilen.

$$\epsilon_r \approx 1 \text{---} 10 \quad \text{In diese Gruppe gehören alle Stoffe bis auf wenige Ausnahmen.}$$

$$\epsilon_r \approx 10 \text{---} 100 \quad \text{Diese Werte werden von keramischen Werkstoffen erreicht.}$$

$$\epsilon_r \approx 5000 \quad \text{Derartige Werte erreicht man nur mit einer speziellen Keramiksorte (Bari-}$$

umtitanat), die unter dem Handelsnamen Epsilon bekannt geworden ist.

Natürlich ist eine scharfe Trennung in diese drei Gruppen nicht möglich, das ist für einen allgemeinen Überblick auch nicht erforderlich. Benötigt man für Berechnungen die exakten Werte, so muß man die Datenblätter der Hersteller einsehen.

1.0.4. Verlustfaktor - Güte

Bisher wurde von Kapazität schlechthin gesprochen und dabei meist an die ideale Kapazität gedacht, wie sie in der Elektrotechnik dargestellt wird. Danach ist das Dielektrikum absolut undurchlässig für Ladungsträger. Das Symbol des idealen Kondensators zeigt Bild 0.2.

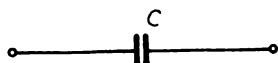


Bild 0.2 Schaltzeichen
der idealen Kapazität

Schaltet man im Gleichspannungsbetrieb einen Strommesser vor den technischen Kondensator, so stellt man fest, daß auch nach Abklingen des Ladevorganges ein konstanter Strom weiterfließt, dessen Stärke sich nach der Art des Kondensators richtet. Mit dem Schaltbild des idealen Kondensators ist diese Erscheinung nicht zu erklären. Hier macht es sich erforderlich, ein geeignetes Ersatzschaltbild für den realen Kondensator zu finden. Betrachtet man nach wie vor den Kondensator, besser gesagt die Kapazität, als ideal, dann muß für Ladungsträger ein Parallelweg endlichen Widerstandes bestehen. Aus dieser Überlegung kommt man zum physikalisch sinnvollen Ersatzschalt-

bild nach Bild 0.3. ~

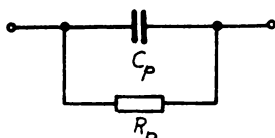


Bild 0.3 Physikalisch
sinnvolles Ersatzschalt-
bild des realen Konden-
sators

Es sei betont, daß hier das einfachste aller Ersatzschaltbil-
der vorliegt, der Einfluß der Eigeninduktivität beispielswei-
se ist dabei nicht berücksichtigt. Mit dem Parallelersatz-
schaltbild allein kommt man nicht aus, darum rechnet man auf
das Reihenersatzschaltbild um; siehe Bild 0.4.

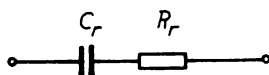


Bild 0.4 Umgerechnetes
Reihenersatzschaltbild

In der Praxis ist die Umrechenbarkeit von Parallel- in Reihen-
schaltung und umgekehrt mitunter recht dienlich. Die Werte der
Schaltelemente für Reihen- und Parallelschaltung unterscheiden
sich oft um mehrere Zehnerpotenzen, so daß eine der Schaltungen
technisch immer besser zu realisieren ist. Hier soll nur die
Umrechnung von der physikalisch sinnvollen Parallelschaltung
auf die Reihenschaltung erfolgen.

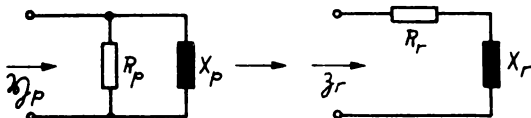


Bild 0.5 Umrechnung einer Parallel-
schaltung in eine wertgleiche Reihen-
schaltung

$$Y_P = G_P + jB_P$$

$$Z_r = R_r + jX_r$$

$$Z_P = \frac{1}{G_P + jB_P}$$

$$= \frac{G_P}{G_P^2 + B_P^2} - j \frac{B_P}{G_P^2 + B_P^2}$$

$$Z_P = Z_r$$

$$\frac{G_P}{G_P^2 + B_P^2} - j \frac{B_P}{G_P^2 + B_P^2} = R_r + jX_r$$

$$R_r = \frac{G_P}{G_P^2 + B_P^2} \quad X_r = \frac{B_P}{G_P^2 + B_P^2}$$

$$G_P^2 + B_P^2 = |Y_P|^2$$

$$G_P = \frac{1}{R_P}$$

$$\frac{1}{|Y_P|^2} = |Z_P|^2$$

$$B_P = -\frac{1}{X_P}$$

$$R_r = \frac{|Z_P|^2}{R_P}$$

$$X_r = \frac{|Z_P|^2}{X_P}$$

$$R_r \cdot R_P = |Z_P|^2$$

$$X_r \cdot X_P = |Z_P|^2$$

Das Ergebnis dieser Umrechnung ist einfach, und es empfiehlt sich, die Formeln einzuprägen; denn das Produkt von Wirk- oder Blindwiderstand der Reihen- und Parallelschaltung ergibt immer den quadrierten Betrag des komplexen Eingangswiderstandes der Schaltung. Mit Hilfe der komplexen Darstellung von Wechselstromgrößen und der Gaußschen Zahlenebene soll nunmehr der Begriff Verlustfaktor hergeleitet werden.

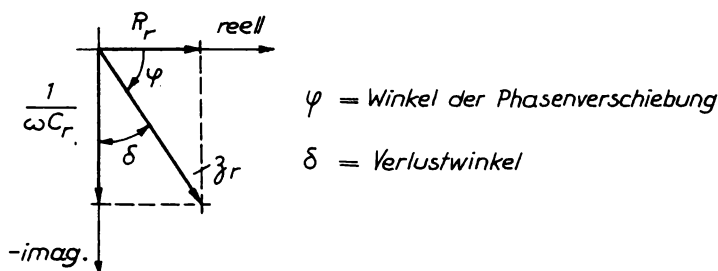


Bild 0.6 Zeigerdiagramm eines komplexen Widerstandes mit Kapazität

$$z_r = R_r + \frac{1}{j\omega C_r} = R_r - j \frac{1}{\omega C_r}$$

$$z_r = |z_r| \cdot e^{-j\varphi}$$

$$|z_r| = \sqrt{R_r^2 + \frac{1}{(\omega C_r)^2}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\frac{1}{\omega C_r}}{R_r} = \arctan \frac{1}{\omega C_r R_r}$$

$$\tan \delta = \frac{R_r}{\frac{1}{\omega C_r}} = \omega C_r R_r \quad \text{Verlustfaktor der Reihenersatzschaltung}$$

Der Tangens des Verlustwinkels wird Verlustfaktor genannt. Was ist nun in dem betrachteten System als Verlust anzusehen? Nach dem Energiesatz ist die Energiesumme eines abgeschlossenen physikalischen Systems konstant. Als Verlust wird gewöhnlich der Energieanteil bezeichnet, der für den beabsichtigten Effekt nicht mehr zur Verfügung steht. Es handelt sich dabei um irreversible Energieumsätze, wie sie beispielsweise in einem stromdurchflossenen ohmschen Widerstand auftreten. In den Ersatzschaltbildern der technischen Kapazitäten sind

solche ohmschen Widerstände vorhanden, man nennt sie jetzt auch Verlustwiderstände.

In diesen Verlustwiderständen wird beim Betreiben der Bauelemente Verlustleistung umgesetzt. Diese Leistung steht dann natürlich für den Nutzeffekt nicht mehr zur Verfügung. Die Nachrichtentechnik muß in ihren Systemen oft mit sehr geringen Energiebeträgen auskommen. Man hat dann natürlich kein Interesse daran, einen großen Teil der zugeführten Energie in den Verlustwiderständen umzusetzen, denn dadurch wird die Weiterverarbeitung des Nutzsignales in Frage gestellt. Betrachtet man das Zeigerdiagramm der Reihenersatzschaltung (Bild 0.6), so findet man, daß mit steigendem Verlustwiderstand R_r der Verlustwinkel immer größer wird. Demzufolge steigt auch der Verlustfaktor, und diesem ist wiederum die Verlustleistung direkt proportional, worüber später noch zu sprechen sein wird. Der Verlustfaktor ist also ein Qualitätsmaß für den Kondensator. Ist der Verlustfaktor klein, so wird nur ein geringes Maß an Verlustleistung umgesetzt. Die üblichen Werte für technische Kondensatoren liegen bei $\tan \delta \approx 10^{-3}$ für eine Meßfrequenz von 800 Hz.

Mitunter ist es vorteilhaft, wenn man mit dem Kehrwert des Verlustfaktors arbeitet. Man definiert:

$$g_c = \frac{1}{\tan \delta_c} \quad \text{Güte eines Kondensators.}$$

Das Einprägen von Formeln ist nicht ganz einfach, weil im Verlaufe eines technischen Studiums eine Vielzahl verschiedenartigster Beziehungen benötigt werden. Besser ist es in jedem Fall, sich eine begriffliche Vorstellung zu schaffen. Bei der Herleitung des Verlustfaktors können wir feststellen, daß Wirk- durch Blindkomponente dividiert wurde. Diesen Sachverhalt sollte man festhalten. Im Fall einer Reihenschaltung muß es heißen: Wirkwiderstand dividiert durch Blindwiderstand, bei der Parallelschaltung hingegen: Wirkleitwert dividiert durch Blindleitwert. Stellt man Leistungsbetrachtungen an, so stellt der Quotient aus Wirkleistung und Blindleistung ebenfalls den Verlustfaktor dar. Man hüte sich jedoch, aus der

Kenntnis über die Verlustfaktoren zweier Kondensatoren leichtfertig einen Wertigkeitsvergleich abzuleiten; Der Verlustfaktor kann jeweilig nur in Verbindung mit der Frequenz eingeschätzt werden.

Die bisher angestellten Betrachtungen über den Verlustfaktor von Kondensatoren beziehen sich auf einzelne Exemplare. In allen möglichen Schaltungen der Elektrotechnik finden sich jedoch Kombinationen von Kapazitäten mit Induktivitäten und ohmschen Widerständen. Da nun die einzelnen Schaltelemente verlustbehaftet sind, sind es demzufolge auch die Gesamtschaltungen. An dieser Stelle beliebige Schaltungen zu untersuchen ist sinnlos; wir beschränken uns bewußt auf Reihen- und Parallelschaltungen von Kondensatoren.

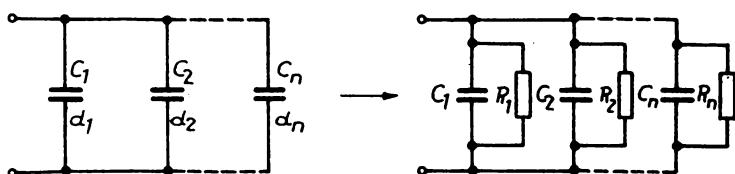


Bild 0.7 Parallelschaltung - n - verlustbehafteter Kondensatoren

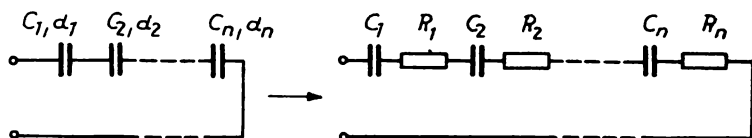


Bild 0.8 Reihenschaltung - n - verlustbehafteter Kondensatoren

$$\tan \delta_1 = \frac{1}{\omega C_1 \cdot R_1} = d_1 \Rightarrow R_1 = \frac{1}{\omega C_1 \cdot d_1}$$

$$\tan \delta = \frac{\sum_{v=1}^n G_v}{\sum_{v=1}^n B_v}$$

$$Y_j = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + j\omega(C_1 + C_2 + \dots + C_n)$$

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}{\omega(C_1 + C_2 + \dots + C_n)} \\ &= \frac{\omega C_1 d_1 + \omega C_2 d_2 + \dots + \omega C_n d_n}{\omega(C_1 + C_2 + \dots + C_n)} \\ &= \frac{C_1 \cdot d_1 + C_2 \cdot d_2 + \dots + C_n d_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n} \end{aligned}$$

$$\tan \delta = \frac{\sum_{v=1}^n (C \cdot d)_v}{\sum_{v=1}^n C_v}$$

Gesamtverlustfaktor für
n-parallel-geschaltete
Kondensatoren

$$\tan \delta_1 = \omega C_1 R_1 = \alpha_1 \Rightarrow R_1 = \frac{\alpha_1}{\omega C_1}$$

$$\tan \delta = \frac{\sum_{v=1}^n R_v}{\sum_{v=1}^n X_v}$$

$$Z = R_1 + R_2 + \dots + R_n + \frac{1}{j\omega} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right)$$

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{\frac{1}{\omega} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right)} \\ &= \frac{\frac{\alpha_1}{\omega C_1} + \frac{\alpha_2}{\omega C_2} + \dots + \frac{\alpha_n}{\omega C_n}}{\frac{1}{\omega} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right)} \\ &= \frac{\frac{\alpha_1}{C_1} + \frac{\alpha_2}{C_2} + \dots + \frac{\alpha_n}{C_n}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}} \end{aligned}$$

$$\tan \delta = \frac{\sum_{v=1}^n \frac{\alpha_v}{C_v}}{\sum_{v=1}^n \frac{1}{C_v}}$$

Gesamtverlustfaktor für n in
Reihe geschaltete
Kondensatoren

Oben wurde bereits festgestellt, daß der Verlustfaktor technischer Kondensatoren ziemlich klein ist. Für die Umrechnung von Parallel- in Reihenschaltung und umgekehrt ergibt sich damit eine interessante Betrachtung. Um den Aufwand zu verkleinern, werden die Teilergebnisse der früher durchgeführten Umrechnung verwendet.

$$\begin{aligned}
 R_r &= \frac{G_p}{|Y_p|^2} ; G_p = \frac{1}{R_p} ; |Y_p|^2 = G_p^2 + B_p^2 ; B_p = \omega C \\
 &= \frac{1}{R_p} \cdot \frac{1}{G_p^2 + B_p^2} = \frac{1}{R_p} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_p^2} + \omega^2 C_p^2} \\
 &= \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}
 \end{aligned}$$

$$R_r = \frac{R_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \quad \left| \begin{array}{l} : (\omega C_p R_p)^2 \\ : (\omega C_p R_p)^2 \end{array} \right.$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (\text{Vergl. Aufg. 2})$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\frac{R_p}{(\omega C_p R_p)^2}}{\frac{1}{(\omega C_p R_p)^2} + 1} = \frac{R_p \cdot \tan^2 \delta}{\tan^2 \delta + 1}
 \end{aligned}$$

$$\text{für } \tan^2 \delta \ll 1 \implies$$

$$R_v \approx R_p \cdot \tan^2 \delta$$

$$X_r = - \frac{B_p}{|\mathcal{Y}|^2} = - \frac{\omega C_p}{\frac{1}{R_p^2} + \omega^2 C_p^2}$$

$$- \frac{1}{\omega C_r} = - \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + (\omega C_p R_p)^2}$$

$$\frac{1}{C_r} = \frac{\omega^2 C_p R_p^2}{1 + (\omega C_p R_p)^2} \quad \left| \begin{array}{l} : (\omega C_p R_p)^2 \\ : (\omega C_p R_p)^2 \end{array} \right.$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (\text{Vergl. Aufg. 2})$$

$$\frac{1}{C_r} = \frac{\frac{1}{C_p}}{\frac{1}{(\omega C_p R_p)^2} + 1} = \frac{\frac{1}{C_p}}{\tan^2 \delta + 1}$$

für $\tan^2 \delta \ll 1 \implies$

$C_r \approx C_p$

Bei der Auswahl von Kondensatoren muß man sich immer über den Wert des Verlustfaktors informieren. Es sei nochmals besonders darauf hingewiesen, daß der Verlustfaktor eines technischen Kondensators sowohl von der Frequenz als auch von der Temperatur abhängig ist. In den Standards und in den technischen Unterlagen der Hersteller findet man die entsprechenden Angaben.

1.0.5. Isolationswiderstand - Zeitkonstante

Es wurde bereits festgestellt, daß technische Kondensatoren endliche Isolationswiderstände besitzen. Elektrolyt-Kondensatoren und Kondensatoren mit Nennspannungen unter 100 V, werden zur Feststellung des Isolationswiderstandes bei 20 °C an Nennspannung gelegt; und nach einer Minute mißt man den Strom. Bei Kondensatoren mit einer Nennspannung über 100 V legt man zur Messung 100 V an die Beläge. Der Quotient aus Spannung und Strom ist der Isolationswiderstand.

Zur Beurteilung der Isolation eines Kondensators verwendet man aber im allgemeinen die Zeitkonstante. Diese ist von den Lade- und Entladevorgängen bei Kondensatoren her bekannt. Mit Hilfe eines Entladevorganges soll hier an die Zusammenhänge erinnert werden. Ist nach dem Aufladen ein technischer Kondensator wieder völlig vom Netz getrennt, so entlädt er sich über seinen eigenen Isolationswiderstand. Lade- und Entladevorgänge verlaufen bei Speicherelementen nach e-Funktionen.

$$u_c = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Verlauf der Kondensatorspannung beim Entladevorgang

$$\tau = C \cdot R \quad \text{Zeitkonstante}$$

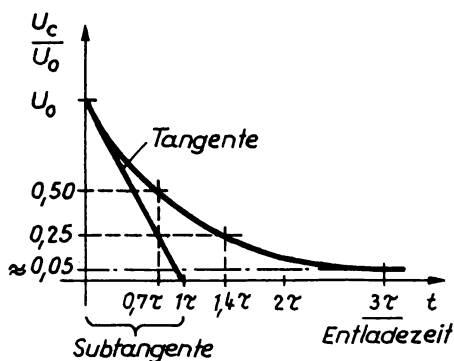


Bild 0.9 Kondensatorspannung
als Funktion der Zeit (Entladung)

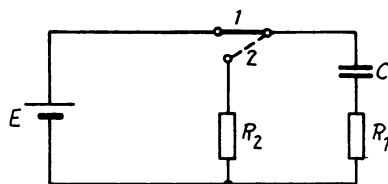


Bild 0.10 Zur Zeitkonstanten

Die e-Funktionen spielen in der Elektrotechnik eine bedeutende Rolle, so daß man sich mit einigen ihrer Eigenschaften vertraut machen muß. Eine e-Funktion klingt erst im Unendlichen ab, was bedeuten würde, daß ein Kondensator erst nach unendlich langer Zeit entladen wäre. Für technische Belange muß man sich natürlich auf relativ kurze Zeiträume orientieren. In vielen Fällen betrachtet man einen Kondensator nach der Zeit 3τ als entladen. Eine einfache Rechnung zeigt, daß

nach dieser Zeit die Restladung und damit die Restspannung noch etwa 5% vom Anfangswert ausmacht. Nicht in allen Fällen wird man mit diesem Wert arbeiten können, und so findet man auch Angaben, bei denen die Entladezeit auf 5τ festgesetzt wurde. Selbstverständlich muß man jeweilig den Einsatzzweck berücksichtigen, wir wollen uns hier an die genannten 3τ halten. Nach Definition ist die Zeitkonstante des Kondensators. das Produkt $C \cdot R$. Hierbei ist darauf zu achten, daß immer der Widerstand gerechnet wird, der entweder vom Lade- oder Entladestrom durchflossen wird. Nach Bild 10 erkennt man, daß für Ladung und Entladung unterschiedliche Zeitkonstanten auftreten. Für Ladung (Schalterstellung 1) wird $\tau_{auf} = R_1 \cdot C$, und für Entladung (Schalterstellung 2) wird $\tau_{ent} = (R_1 + R_2) \cdot C$. Auf graphischem Wege findet man die Zeitkonstante als Subtangente an die e-Funktion. Vorteilhaft legt man im Zeitpunkt $t = 0$ die Tangente an die Funktion; dann wird auf der Zeitachse das Maß 1τ abgeschnitten, womit man häufig die Teilung der Zeitachse vornimmt (Bild 0.9). Des weiteren sei darauf hingewiesen, daß bei der e-Funktion auf gleich große Änderungen der unabhängig Variablen (Zeit) gleich große prozentuale Änderungen der abhängig Variablen (Kondensatorspannung) folgen. In diesem Zusammenhang sollte man sich den Begriff Halbwertszeit einprägen. Nach Ablauf der Halbwertszeit ist die e-Funktion auf die Hälfte ihres Wertes abgeklungen, oder die Kondensatorladung ist nur noch halb so groß. Die Halbwertszeit liegt in guter Näherung bei $0,7 \tau$. Bei der Kondensatorentladung findet man nach $0,7 \tau$ noch 50%, nach $1,4 \tau$ noch 25%, nach $2,1 \tau$ noch 12,5% von U_0 usf. Mit dieser Kenntnis kann man immer sehr schnell und mit guter Genauigkeit die e-Funktion skizzieren.

Je größer nun die Zeitkonstante ist, um so länger dauert offenbar die Entladung, d.h., um so größer ist der Isolationswiderstand. Gerade das aber ist es, was für die Bemessung des Verlustfaktors von Bedeutung ist. Eine große Zeitkonstante bedeutet also nichts anderes als geringe Verluste; man denke je-

doch an die dielektrischen Verluste, die bei höheren Frequenzen die Leitfähigkeitsverluste bedeutend übersteigen können. Die Zeitkonstante kann somit als direktes Gütemaß für den Kondensator angesehen werden. Es ist ratsam, sich eine gewisse Größenvorstellung von den technisch erreichbaren Werten zu schaffen:

$\tau = 200 \text{ s}$	Kondensator mäßiger Qualität
$\tau = 1000 \text{ s}$	Kondensator guter Qualität
$\tau = 5000 \text{ s}$	Kondensator sehr guter Qualität

Bei den vorstehenden Angaben beachte man jedoch, daß es viele verschiedene Arten von Kondensatoren gibt und daß die Zeitkonstante auch innerhalb einer Art beträchtliche Unterschiede aufweisen kann. Für die Entladezeit eines Kondensators sollte die Zeit 3τ angesetzt werden. Mit den hier genannten Zahlenwerten ergeben sich immerhin Zeiten, die bei einigen Stunden liegen können. Personen, die mit Kondensatoren zu arbeiten haben, unterliegen damit einer bestimmten Gefährdung, da man einem Kondensator den Ladungszustand nicht ansehen kann. Berührt eine Person die Anschlußelemente eines nicht entladenen Kondensators, so ist damit ein Widerstand von bestenfalls einigen Kilohm in den Entladekreis geschaltet und die Zeitkonstante entsprechend klein. Der Kondensator kann sich gewissermaßen schlagartig entladen, was Schockwirkungen auslöst, die von Reflexbewegungen begleitet sind und dadurch größere Unfälle bewirken können. Um Unfälle zu vermeiden, sollte man nach jedem Arbeiten mit Kondensatoren diese unbedingt über einen Widerstand entladen. Es empfiehlt sich, Kondensatoren größerer Kapazität mit Nennspannungen ab 500 V für Lagerung und Transport kurzzuschließen. Hersteller größerer Kondensatoren (Phasenschieberkondensatoren) liefern diese mit Kurzschlußbrücken an.

1.0.6. Verlustleistung bei Kondensatoren

In den beiden vorhergehenden Punkten wurden Verlustfaktor und Isolationswiderstand untersucht, die für die auftretende Verlustleistung von Bedeutung sind. Die Berechnung der Verlust-

leistung soll am Parallelersatzschaltbild erfolgen.

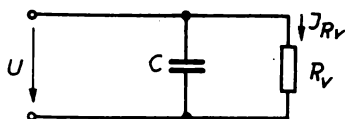


Bild 0.11 Zur Verlustleistung

Legt man an den Kondensator zunächst eine Gleichspannung, dann lassen sich ohne Schwierigkeiten die anstehende Spannung und der durchfließende Strom messen. Das Produkt aus beiden ist bereits die gesuchte Verlustleistung. Diese wird in diesem Fall durch die Leitfähigkeit des Dielektrikums und durch Kontaktwiderstände sowie durch die ohmschen Widerstände der Zuleitungen und der Beläge verursacht. Legt man dagegen eine Wechselspannung an (sinusförmig), so ergeben sich grundsätzlich andere Verhältnisse. Der Strom durch den Verlustwiderstand läßt sich nun nicht mehr so ohne weiteres messen, denn man muß sich daran erinnern, daß im Bild 0.11 das Ersatzschaltbild dargestellt ist und der Verlustwiderstand R_V als separater Widerstand nicht existiert. Die Spannung ist aber nach wie vor ohne Schwierigkeiten zu messen. Davon soll die Berechnung ausgehen.

$$P_V = \frac{U^2}{R_V} \quad \tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R_V} \quad \Rightarrow \quad R_V = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot \tan \delta}$$

$$P_V = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta$$

Verlustleistung des Kondensators

Aus dieser Berechnung sieht man, daß der Verlustwiderstand frequenzabhängig ist. In diesem Verlustwiderstand sind alle Anteile vereinigt, die Wirkverluste verursachen. Bei Wechselspannungsbeanspruchung treten neben Verlusten in ohmschen Widerständen zusätzlich dielektrische Verluste auf. Die Ver-

luste, welche durch ohmsche Widerstände bedingt sind, bedürfen keiner besonderen Erörterung; denn fließen endliche Ströme durch endliche Widerstände, dann stellt das Produkt $I^2 \cdot R$ eine endliche Wirkleistung dar. Als Verlustleistung bezeichnet man derartige Leistungen dort, wo sie unerwünscht auftreten.

Der Grund für das Auftreten von dielektrischen Verlusten liegt zunächst einmal darin, daß es keine idealen Dielektrika gibt. Alle realen Dielektrika besitzen polarisierte Atom- oder Molekülgruppen, oder, mit anderen Worten gesagt, im Innern dieser Stoffe findet man eine Vielzahl elektrischer Dipole. Diese Dipole richten sich in dem von außen aufgezwungenen elektrischen Feld aus. Im Wechselfeld werden sie fortwährend um eine mittlere Ruhelage gedreht. Bei dieser Drehung müssen die inneren Kräfte zwischen den Molekülen überwunden werden, wobei endliche Wege zurückgelegt werden. Kräfte entlang von Wegen zu überwinden bedeutet aber nichts anderes, als daß Arbeit verrichtet werden muß. Je öfter nun die Feldrichtung pro Zeiteinheit geändert wird, je höher also die Frequenz ist, um so mehr Energie muß dem Dielektrikum in der Zeiteinheit zugeführt werden. Energieänderung pro Zeiteinheit ist aber nichts anderes als Leistung, und wie man aus obiger Formel sieht, ist die Verlustleistung der Frequenz direkt proportional. Für das ideale Dielektrikum müßte die Forderung bestehen, daß es frei ist von elektrischen Dipolen.

Die Verlustleistung ist aber nicht nur der Frequenz direkt proportional, sondern auch dem Verlustfaktor. Von der Verbraucherseite her geht an die Hersteller von Kondensatoren die Forderung, die Verlustfaktoren so klein wie möglich zu machen. Diese Forderung wird eingeengt durch die Verwendung realer Dielektrika, wobei gleichzeitig an die Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors zu denken ist.

Die Verlustleistung ist nun weiterhin der Kapazität proportional. Hier ist man aber an den Einsatzzweck gebunden, in einer Schaltung benötigt man eine ganz bestimmte Kapazität, die man aus Gründen der Verlustleistung nicht verkleinern kann. Allerdings sollte man daran denken, daß im technischen Bereich

die Kapazitätswerte über mehrere Zehnerpotenzen hinweg variiert werden können. Über den gleichen Bereich ist dann natürlich die Verlustleistung variabel.

Als letzte, aber wichtigste Einflußgröße auf die Verlustleistung bleibt die Spannung zu betrachten. Offensichtlich geht die Spannung quadratisch in das Ergebnis ein, so daß schon geringfügige Überschreitungen der Nennspannung einen beträchtlichen Leistungsanstieg zur Folge haben. Ein willkürliches Erhöhen der Verlustleistung durch Überschreiten der Nenndaten ist natürlich nicht zulässig; denn alle Bauelemente sind für einen ganz bestimmten Verlustleistungsumsatz zugeschnitten, der an die Nennbetriebsdaten gebunden ist. Welche Bedeutung hat nun aber der Umsatz an Verlustleistung in Kondensatoren? Mit einfachen Worten kann man sagen, die zugeführte Elektroenergie wird in Wärmeenergie umgeformt. Im Kondensator entstehen Wärmemengen, die das Bauelement aufheizen. Eine Zunahme der Kondensatortemperatur ist jedoch allgemein als kritisch zu betrachten. Die innere energetische Situation im Dielektrikum wird verändert, was Änderungen des physikalischen Verhaltens dieses Stoffes nach sich zieht. So kann z.B. die Dielektrizitätskonstante zu- oder abnehmen, die Durchschlagsfestigkeit kann steigen oder fallen, ja es können sich alle physikalischen Eigenschaften ändern; allerdings ist das nicht immer als Verschlechterung zu sehen.

An dieser Stelle sei besonders auf die Prüfungen der Kondensatoren hingewiesen. Aus dem über die Verlustleistung Gesagten ist sofort verständlich, daß Prüfvorgänge immer zeitlich zu begrenzen sind, denn das Bauelement muß durch die beträchtliche Erhöhung der Spannung einen immensen Leistungsanstieg ertragen.

Zusammenfassend kann man sagen: Eine erhöhte Verlustleistung, die einem Kondensator über längere Zeit zugemutet wird, bewirkt eine Änderung der technischen Parameter und stellt damit die Funktionstüchtigkeit der jeweiligen Schaltung in Frage. Es liegt weiterhin auf der Hand, daß eine extreme Erwärmung zur Zerstörung des Kondensators führen kann.

1.0.7. Temperatur- und Frequenzgang

Es wurde bereits festgestellt, daß durch Verlustleistungsumsatz eine Änderung der technischen Parameter eintritt. Diese Änderungen werden zunächst durch die Änderung der Kondensatortemperatur selbst bewirkt. Eine Änderung der Umgebungstemperatur aber führt ebenfalls eine Änderung der Kondensatortemperatur herbei, und es werden die gleichen physikalischen Effekte ausgelöst.

Die Kapazität oder auch der Verlustfaktor sind Funktionen der Temperatur, man spricht vom Temperaturgang der Kapazität oder des Verlustfaktors. Ändern sich die Parameter eines Bauelements, dann ist damit natürlich die Funktionstüchtigkeit ganzer Schaltungen oder Geräte in Frage gestellt. In einem Schwingungskreis ändert sich mit der Kapazität zum Beispiel die Resonanzfrequenz.

Es ist verständlich, daß man derartige Änderungen nicht wünscht. Das Temperaturintervall, in dem man technische Kondensatoren einsetzt, erstreckt sich von etwa -65°C bis $+100^{\circ}\text{C}$. Da nun alle Arten von Kondensatoren mehr oder weniger mit Temperaturgang behaftet sind, wünscht man sich wenigstens einen linearen Verlauf desselben. Leider ist der Temperaturgang nur für einige Kondensatorenarten näherungsweise im interessierenden Intervall linear. Mit Hilfe der folgenden Skizze sollen einige Begriffe geklärt werden.

Im Bild 0.12 ist der Einfachheit halber ein linearer Temperaturgang dargestellt. Die Nennkapazität der Kondensatoren wird im allgemeinen bei 20°C festgelegt. Bei dieser Temperatur ist dann die relative Änderung null, und die Kurve des Temperaturganges muß dort die Temperaturachse schneiden. Es soll nun untersucht werden, welche mathematischen Verknüpfungen sich ergeben und was man unter dem Temperaturkoeffizienten versteht.

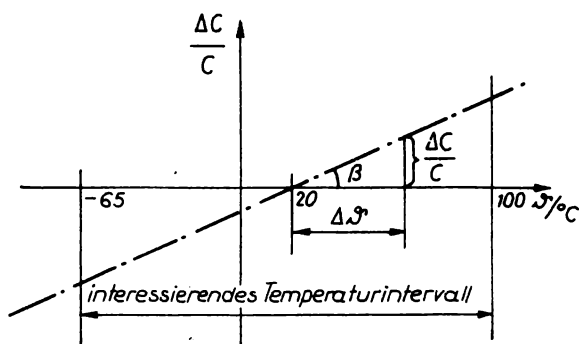


Bild 0.12 Linearer Temperaturgang eines Kondensators

$$\alpha_C = \frac{\Delta C}{C \cdot \Delta T}$$

Definitionsgleichung des Temperaturkoeffizienten der Kapazität

$$\alpha_C = \frac{2(C_2 - C_1)}{(C_1 + C_2)(T_2 - T_1)}$$

Bemessungsgleichung des Temperaturkoeffizienten der Kapazität nach Standard

C_1 = Anfangskapazität

C_2 = Endkapazität

T_1 = Anfangstemperatur

T_2 = Endtemperatur

$$\tan \beta = \frac{\frac{\Delta C}{C}}{\Delta T} = \alpha_C$$

Steigungsmaß der Temperaturgangkurve

$$\Delta C = C \cdot \alpha_C \cdot \Delta T$$

Absolute Kapazitätsänderung

Zur Definition des Temperaturkoeffizienten präge man sich ein: Es wird immer die relative Änderung der jeweilig untersuchten physikalischen Größe auf ein Grad Temperaturänderung bezogen. Diese Definition hat also allgemeinen Charakter. An der dargestellten Skizze läßt sich sofort erkennen, daß das Steigungsmaß der Temperaturgangkurve ein Maß für den Temperaturkoeffizienten ist. Das Steigungsmaß einer linearen Funktion ist konstant, demzufolge auch der Temperaturkoeffizient für einen linearen Temperaturgang. Es kommen sowohl positive als auch negative Temperaturkoeffizienten in Betracht, wobei vor allem die negativen eine besondere Rolle bei Temperaturkompensationen spielen. Temperaturkompensation kommt praktisch nur für lineare Temperaturgänge in Frage. Bei nichtlinearen Temperaturgängen ist der Temperaturkoeffizient selbst eine Funktion der Temperatur, und die Kompensation ist kaum noch möglich, zumindest aber außerordentlich kompliziert. Für konstante Temperaturkoeffizienten lassen sich die für bestimmte Temperaturen ergebenden Kapazitätswerte leicht berechnen.

$$C = f(T)$$

$$C(T) = C + \Delta C = C + C \cdot \alpha_C \cdot \Delta T$$

$$C(T) = C(1 + \alpha_C \cdot \Delta T)$$

Kapazität als Funktion der Temperatur

Es sei hier erwähnt, daß die angestellten Betrachtungen im übertragenen Sinne auch auf den Verlustfaktor anwendbar sind. Überwiegend findet man bei den technischen Kondensatoren nichtlineare Temperaturgänge. Bei den verschiedenen Arten der Kondensatoren wird gelegentlich von den Temperaturkoeffizienten zu sprechen sein.

Wenn man über die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Parameter spricht, sollte man daran erinnern, daß auch der Isolationswiderstand temperaturabhängig ist. Leider lassen sich auch hier keine eindeutigen Angaben machen. Wie die Praxis zeigt, sind die Änderungen im allgemeinen nichtlinear und mit

positivem oder negativem Temperaturkoeffizienten behaftet. Genaueres über die einzelnen Kondensatorentypen findet man in den Datenblättern.

Nachdem der Temperaturgang untersucht wurde, kann die Betrachtung des Frequenzganges mit wenigen Worten erfolgen.

Im Vorstehenden braucht man an sich nur das Wort Temperatur durch das Wort Frequenz auszutauschen, allerdings ist ein linearer Frequenzgang der Kondensatoren nicht zu erwarten. Will man wissen, was bei einer bestimmten Frequenz von dem Bauelement zu erwarten ist, dann muß man die Kurven, die von den Herstellern aufgenommen werden, zu Rate ziehen. Man versteht also unter Frequenzgang nichts anderes, als daß die technischen Parameter Funktionen der Frequenz werden.

1.0.8. Kontaktsicherheit und Dämpfungsarmut

Der Begriff Sicherheit kommt in der Technik sehr häufig vor. Man versteht gewöhnlich darunter das Verhältnis der Zerstörungsbeanspruchung zur jeweilig vorliegenden Beanspruchung. Herrscht im Dielektrikum eines Kondensators beispielsweise eine Feldstärke von $E = 50 \text{ kV/cm}$ und ist die Durchbruchfeldstärke $E_d = 250 \text{ kV/cm}$, dann ist die Sicherheit offenbar $s = 5$. Auf den Begriff der Kontaktsicherheit läßt sich dieses Verfahren allerdings nicht anwenden. Es soll nunmehr untersucht werden, was man unter Kontaktsicherheit verstehen will.

In allen Bereichen der Elektrotechnik findet man eine Unmenge von Kontaktstellen. Zum Teil werden dauerhafte, unlösbare Verbindungen benötigt, zu einem anderen Teil Kontakte, die sich öffnen lassen; in allen Fällen werden aber gleiche oder verschiedenartige Leiterwerkstoffe zur Berührung gebracht. Die Kontaktstelle bildet eine Stromübergangsstelle.

Im Bild 0.13 ist ein Paar Federkontakte dargestellt.

Drückt man die Kontakte mit der Kontaktkraft F_K zusammen, so wird das Fließen des Stromes I möglich. Dieser Strom muß den Kontaktwiderstand R_K passieren und bewirkt dabei einen Spannungsabfall U_K . Die Stelle des Stromüberganges ist da-

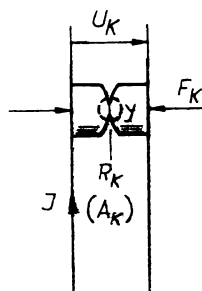


Bild 0.13
Federkontakte

bei keine geschlossene Fläche, sondern die Kontaktfläche A_K wird von einer Anzahl sich berührender Spitzen gebildet (Siehe Bild 0.14).

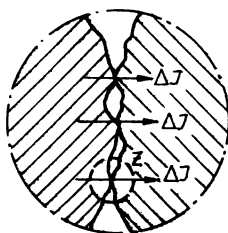


Bild 0.14
Einzelheit bei „y“

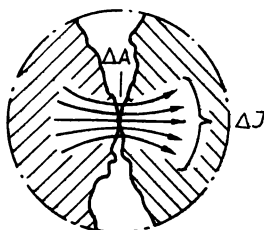


Bild 0.15
Einzelheit bei „z“

Im Bild 0.15 ist, nochmals stark vergrößert, eine Stromübergangsstelle, die man Stromenge nennt, dargestellt. Es ist klar, daß in den Stromengen ein beträchtlicher Anstieg der Stromdichte, im Vergleich zum massiven Kontaktmaterial, auftreten muß. Ein kleiner Anteil ΔJ des Gesamtstromes fließt durch die sehr kleine Kontaktfläche ΔA_K oder, wie man auch sagt, durch den Engewiderstand R_E . Die Parallelschaltung aller Engewiderstände ergibt schließlich den gesamten Kontaktwiderstand R_K . Vom Engewiderstand kann man sich folgende Vorstellung machen. Die beiden Kontakte, gleichgültig aus welchem Metall sie auch bestehen, besitzen eine bestimmte elektrische Leitfähigkeit, die durch die Struktur und den Leitungsmechanismus der Metalle bestimmt wird. Drückt man nun mit der Kontaktkraft die beiden Kontakte zusammen, so werden die sich berührenden Spitzen auf Grund der Elastizität der Metalle abgeplattet, und die Stromübergangsfläche wird größer. Man erkennt, daß der Übergangswiderstand eine Funktion des Kontaktdruckes und der Kontaktfläche ist. Obwohl teilweise mit erheblichen Kontaktdrücken gearbeitet wird, bleibt die Kontaktstelle eine Trennstelle. Das bedeutet, daß hier die normale Gitterstruktur der Metalle nicht existiert und daß die Abstände von den Gefügebausteinen des einen Kontaktes zu denen des anderen Kontaktes relativ groß sind. Sollen Ladungsträger diese Strecke überwinden, so ist dazu mehr Energie erforderlich als im Metallgitter, oder der Übergangswiderstand ist größer als der normale Gefügewiderstand (spezifischer Widerstand). Ob die sich berührenden Kontakte aus gleichen oder aus verschiedenen Metallen bestehen, ist für diese Betrachtungen unerheblich.

Der durch den Kontaktwiderstand fließende Strom verursacht an dieser Stelle einen Spannungsabfall und einen Leistungsumsatz. Für die Nachrichtentechnik stört vor allem die auftretende Kontaktspannung, denn sehr kleine Nutzsignale sind über einer solchen Stelle unter Umständen nicht mehr definierbar. Der Leistungsumsatz kann eine enorme Wärmeentwicklung zur Folge haben, die bis zum Schmelzen der Kontaktmetalle führt.

Unter dem Einfluß der Kontaktkraft werden die nunmehr flüssigen Übergangsstellen vergrößert, die Stromdichte fällt, und das Metall erstarrt wieder. Die Kontakte sind miteinander verschweißt. Dieser Fall ist besonders in der Starkstromtechnik gefürchtet, denn das Auslösen eines Leistungsschalters ist im kritischen Augenblick unmöglich geworden. Die Kontaktstellen eines Bauelementes sollen natürlich nicht getrennt werden, hier kommt es vielmehr auf eine sichere, dauerhafte Verbindung an.

Könnte man den Kontaktwiderstand vermeiden, so würde auch kein Kontaktspannungsabfall und damit kein Leistungsumsatz auftreten. Diesen Fall könnte man als absolute Kontaktsicherheit betrachten. In allen technischen Fällen jedoch ist dieser Zustand nicht realisierbar. Um dem Idealzustand nahe zu kommen, strebt man jeweilig den kleinstmöglichen Kontaktwiderstand an.

Stoffschlüssige Verbindungen haben die geringsten Übergangswiderstände. Dort, wo die Möglichkeit besteht, wird man die Verbindungen durch Löten und Schweißen herstellen. Bei den Wickelkondensatoren verbindet man die Folien durch Punktschweißen, und bei den Keramikondensatoren lötet man die Anschlußlaschen oder -drähte weich an die Beläge.

Es sei jedoch daran erinnert, daß man kontaktsichere Verbindungen auch durch Schrauben und Nieten erzielen kann, wovon an gegebener Stelle natürlich Gebrauch gemacht wird. Schließlich spielen Kontaktfläche und Kontaktdruck eine entsprechende Rolle. Können stoffschlüssige Verbindungen bei einer Kondensatorenart nicht angewendet werden, so legt man, um die Kontaktfläche zu vergrößern, mehrere Ableitungstreifen ein. Der Kontaktdruck wird durch die Vorspannung beim Wickeln erzeugt, oder die Wickel werden beim Einbau in die Gehäuse zusammengepreßt.

In jedem Fall sind aber für die Kontaktsicherheit kleinster Übergangswiderstand und geringster Kontaktspannungsabfall zu fordern. Die Hersteller von Kondensatoren beziehen sich im allgemeinen auf die Angabe einer Kontaktspannung. Man findet

folgende Formulierung: Die Kondensatoren sind hochfrequenzkontaktsicher, auch für Spannungen unter 1mV. Auf den Bauelementen wird diese Kontaktsicherheit mit "k" gekennzeichnet. Wenden wir uns nunmehr der Dämpfungsarmut zu. Die physikalische Erscheinung Dämpfung tritt nur in Systemen auf, in denen physikalische Vorgänge ablaufen, genauer, die Dämpfung ist an Energieänderungen gebunden. Von Dämpfung spricht man hauptsächlich in schwingfähigen Systemen. Alle technischen Systeme sind irgendwie mit Wirkwiderständen behaftet, zu deren Überwindung Energie erforderlich ist. In einem Schwingungskreis pendelt ein gewisser Betrag Energie fortwährend aus dem Kondensator in die Spule und umgekehrt. Bei diesen Vorgängen müssen die Elektronen, als Energieträger, alle Wirkwiderstände entlang ihres Weges überwinden, wobei von dem im Schwingungskreis vorhandenen Energiebetrag verbraucht wird. Diese Energieumsätze sind irreversibel und bewirken im allgemeinen eine Erwärmung des Systems, die nicht erwünscht ist. Überläßt man einen einmalig erregten Schwingungskreis sich selbst, so kommt schließlich die Schwingung zum Erliegen, denn die gesamte Energie wird in den Dämpfungswiderständen umgesetzt. Wünscht man eine Schwingung konstanter Amplitude, dann muß aus dem Netz gerade immer der Energiebetrag nachgeliefert werden, der für eine Schwingung auf die Dämpfung entfällt. In nachrichtentechnischen Anlagen sind die eingespeisten Energiebeträge oft recht klein. Setzt man davon noch einen beträchtlichen Teil in den Verlustwiderständen um, dann ist unter Umständen die Weiterverarbeitung des Nutzsignales in Frage gestellt. Dämpfung darf also nur in geringstmöglichen Maßen auftreten. Als eine der Grundforderungen für dämpfungsarme Bauelemente muß man die Forderung nach Kontaktsicherheit ansehen. Weiterhin ist der ohmsche Widerstand der Anschlußdrähte und der Belagsfolien klein zu halten. In den Begriff der Dämpfungsarmut bezieht man die Induktivitätsarmut ein. Die induktive Komponente der Kondensatoren hat ihren Sitz in den Anschlußdrähten und in den Belagsfolien;

durch geeignete Ausführungsformen der Kondensatoren soll sie klein gehalten werden. Im Bild 0.16 ist zwar die Herstellungstechnologie für diese Variante günstig, die Ladungsträger müssen ihren Weg jedoch durch die gesamte Wickellänge nehmen, wodurch eine große induktive Komponente entsteht.

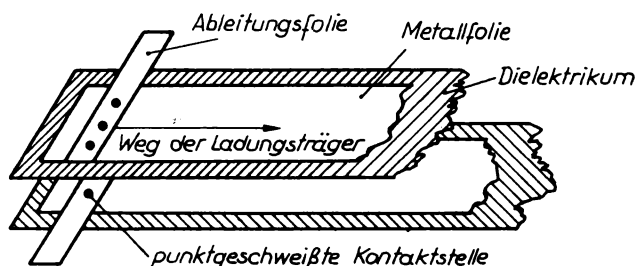


Bild 0.16 Prinzip des Wickelkondensators

Eine wirksame Abhilfe stellt die Ausführung nach Bild 0.17 dar. Die Ableitungstreifen werden in der geometrischen Mitte der Belagsfolien angebracht. Nunmehr fließen die Ladungsträger von der Mitte aus gegensinnig durch den Wickel, die sie begleitenden Magnetfelder kompensieren sich ganz oder teilweise.

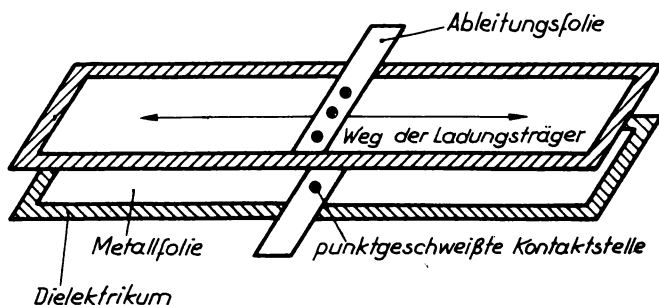


Bild 0.17 Prinzip des Wickelkondensators mit Mittelanzapfung (induktivitätsarme Ausführung)

Eine andere, sehr vorteilhafte Ausführung entsteht, wenn man die Belagsfolien seitlich ein wenig über das Dielektrikum hinausstehen läßt, wie man im Bild 0.18 sehen kann. Nach dem Wickeln knifft man die überstehende Metallfolie an den Stirnflächen zu geschlossenen metallischen Flächen zusammen, an welche man die Anschlußdrähte anbringt. Der Weg der Ladungsträger ist hier sehr kurz, die induktive Komponente ist klein. Der ohmsche Widerstand der Belagsfolien wird ebenfalls günstig beeinflusst, als Querschnitt steht die gesamte Folienlänge multipliziert mit der Folienstärke zur Verfügung, und die Folienbreite entspricht der Leiterlänge. Allerdings ist diese Ausführung nur für Wickelkondensatoren mit einer Schutzumhüllung anwendbar.

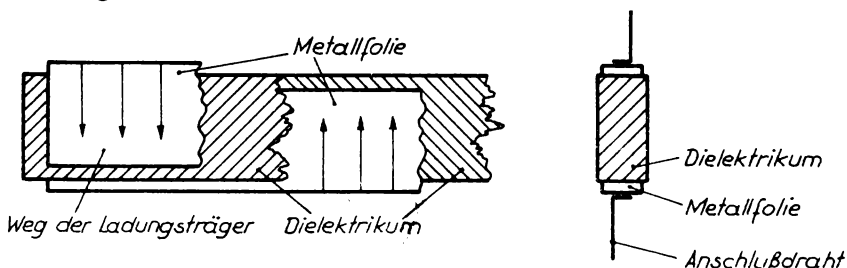


Bild 0.18 Prinzip und Wickel eines besonders dämpfungs- und induktivitätsarmen sowie kontaktsicheren Kondensators

Welche Maßnahmen immer auch eingeleitet, eine vollständige Beseitigung der Verlustwiderstände und der induktiven Komponente ist nicht möglich. Man sollte sich vor solchen Bezeichnungen wie "induktionsfrei" hüten, besser heißt es an der Stelle induktivitätsarm. Ein Kondensator mit besonders geringer induktiver Komponente ist im Bild 0.19 dargestellt. Bei allen Kondensatoren ist auf Grund der Ausführung die induktive Komponente der Belagsfolien klein, ein wesentlicher Anteil entfällt auf die Anschlußdrähte. Mit dem Durchführungskondensator wird der Versuch unternommen, die Anschlußdrähte zu vermeiden. Die kapazitiv zu beschaltende Leitung wird ohne Unterbrechung

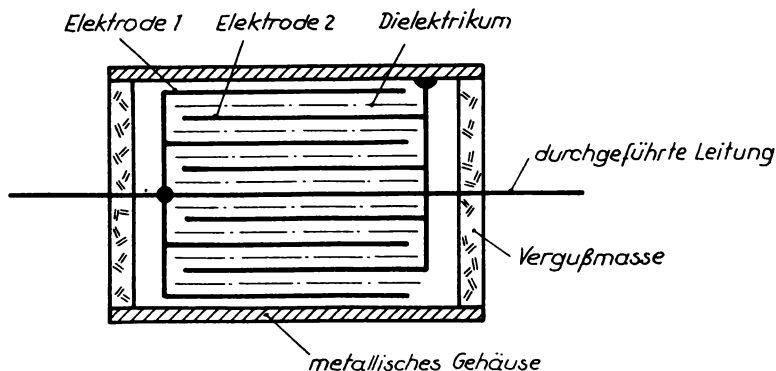


Bild 0.19 Prinzipieller Aufbau eines Durchführungskondensators

durch den Kondensator hindurchgeführt und auf das Potential des einen Belages gelegt. An das metallische Gehäuse legt man das Potential des zweiten Belages, womit praktisch keine Zuleitungsdrähte mehr vorhanden sind, und tatsächlich weist dieser Kondensator die geringste induktive Komponente auf. Leider sind aber die Einsatzmöglichkeiten dieser Kondensatorenart beträchtlich eingeschränkt, deshalb eben, weil nur eine durchgehende Leitung kapazitiv beschaltet werden kann. Als Koppelkondensator ist er völlig ungeeignet. Besondere Bedeutung besitzen die Durchführungskondensatoren für Entstörprobleme.

Auf dem Bauelement erfolgt die Kennzeichnung der Dämpfungsarmut durch "d". Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß dämpfungsarme Kondensatoren auf jeden Fall kontaktsicher sind; "d" schließt also "k" ein.

1.0.9. Alterung

Im Umgang mit Bauelementen findet man, daß sich im Laufe der Zeit die technischen Parameter ändern, wobei gleichgültig ist, ob das Bauelement betrieben oder gelagert wird. Man sagt, das

Bauelement unterliegt einer Alterung.

Die Alterung läßt sich im wesentlichen in zwei Arten unterteilen, in die Materialalterung und in die Kontaktalterung. Für die Fertigung von Kondensatoren werden verschiedene Werkstoffe benötigt, Dielektrika, Metallfolien, Imprägniermittel usw. Diese Stoffe stammen selbst aus Herstellungsprozessen, in denen sie Werkstoffumformungen über sich ergehen lassen mußten. Dabei gelangt der Stoff in eine gewisse Zwangslage, die einen bestimmten Energiezustand entspricht. Es ist gleichgültig, ob man an Stoffe mit einer Struktur oder an amorphe denkt. Im Laufe der Zeit werden Gefügebestandteile, die zwangsverformt wurden, versuchen, einen geringeren Energiezustand zu erlangen. Möglichkeiten dazu ergeben sich durch Energiezufuhr von außen, sei es durch Wärme, Stoß, Schlag oder andere Arten. Gelingt es den Stoffbausteinen, andere Lagen einzunehmen, dann ändert sich auch die physikalische Verhaltensweise. Beim Dielektrikum, welches hauptsächlich interessiert, kann sich eine Änderung der Dielektrizitätskonstanten oder des Isolationswiderstandes ergeben, wodurch sich natürlich Kapazität und Verlustfaktor ändern müssen. Gleichviel, welche Änderungen sich auch einstellen, alle bewirken eine Änderung der technischen Parameter. Damit kommt man zwangsweise wieder auf die Fragen der Zuverlässigkeit von Bauelementen und der Betriebssicherheit von Schaltungen.

Kontaktalterung bedeutet gewöhnlich eine Erhöhung des Übergangswiderstandes. Die Ursachen dafür können sehr verschiedenartig sein. Durch aggressive Bestandteile der Luft können sich Fremdschichten zwischen den Kontaktmetallen bilden, bei nicht genügendem Schutz der Kontaktstelle kann sie durch Korrosion zerstört werden. Bei Nachlassen des Kontaktdruckes ergeben sich häufig undefinierbare Übergangswiderstände. Eine Verringerung des Kontaktdruckes ist möglich durch Materialermüdungserscheinungen, die wiederum von Temperatur- oder anderen Einwirkungen herrühren können. Die Einwirkungen von außen können sehr verschiedenartig sein, allgemein verlaufen die Alterungserscheinungen jedoch nach e-Funktionen.

Diese Tatsache besagt, daß die auftretenden Änderungen kurz nach der Herstellung der Bauelemente besonders groß sind. Aus diesem Grund ist es üblich, die prozentuale Alterungsrate für das erste Jahr nach der Fertigung anzugeben. Die zeitliche Änderung hängt von der Zeitkonstante des jeweiligen Gebildes ab.

Um die Alterungserscheinungen während des Betriebes der Kondensatoren klein zu halten, wendet man die sogenannte künstliche Alterung an. Diese ist nichts grundsätzlich anderes als die natürliche Alterung, es wird lediglich durch geeignete Bedingungen die Zeitkonstante verkleinert, damit der Hauptanteil der Alterung bereits im Herstellerbetrieb vorweggenommen werden kann. Man betreibt Kondensatoren z.B. für längere Zeit bei hohen Temperaturen und überhöhten Spannungen, oder aber es werden Stoßentladungen durchgeführt.

Die künstliche Alterung bedingt bei Bauelementen einen Preisaufschlag.

1.0.10. Prüfklassen der Kondensatoren

In den vorangegangenen Abschnitten wurde über Prüfungen schon mehrfach gesprochen. Hier soll noch kurz etwas zu den sogenannten Prüfklassen gesagt werden.

Kondensatoren werden mit dreizifferigen Zahlen, bezüglich ihrer Prüfkategorie, gekennzeichnet. Mit dieser Angabe ist eine standardisierte Festlegung verknüpft. Die Stellung der Ziffern hat folgende Bedeutung:

1. Ziffer - Prüfung A - Kälte in $^{\circ}\text{C}$
2. Ziffer - Prüfung B - Trockene Wärme in $^{\circ}\text{C}$
3. Ziffer - Prüfung C - Feuchte Wärme in Tagen

Als Beispiel sei angeführt:

Prüfkategorie 465
 ↓
 21 Tage feuchte Wärme
 ↓
 70 $^{\circ}\text{C}$ trockene Wärme
 ↓
 -55 $^{\circ}\text{C}$ Kälte

Es kann nicht Anliegen dieses Lehrbriefes sein, Standards zu interpretieren; es soll hier lediglich als Hinweis dienen,

sich dieser Tatsache gelegentlich zu erinnern und von den Standard Gebrauch zu machen.

1.1. Papierkondensatoren

1.1.1. Aufbau und Herstellung

Papierkondensatoren gehören zu der Gruppe der Wickelkondensatoren. Als Dielektrikum verwendet man heute fast ausschließlich Natronzellulosepapier. Über den prinzipiellen Aufbau der Papierkondensatoren ist nicht viel zu sagen. Metallfolien werden zwischen die Papierbahnen eingelegt und gemeinsam aufgewickelt. Es gehören weiterhin Anschlußfolien dazu, die beim Wickelprozeß eingelegt oder auch an die Belagsfolien angepunktet werden. Schließlich ist eine Schutzumhüllung erforderlich, die dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßt wird. Man betrachte hierzu die Bilder 0.16 bis 0.18.

Die großen Stückzahlen der Papierkondensatoren, die jährlich in allen Zweigen der Elektrotechnik benötigt werden, macht eine industrielle, spezialisierte Fertigung unumgänglich. Die wichtigsten Grundbestandteile sind die Papier- und Metallfolien. Daß für das Papier hauptsächlich Natronzellulosepapier in Frage kommt, wurde schon erwähnt. Es werden Papierdicken von etwa $10\text{---}20\mu\text{m}$ verwendet. Selbstverständlich muß das Papier bestimmte Forderungen erfüllen, es muß einen genügend hohen Isolationswiderstand besitzen, es soll möglichst keine Löcher oder schadhafte Stellen aufweisen. Für die Durchschlagsfestigkeit der Kondensatoren ist besonders wichtig, daß die Papierfolien gleichmäßige Dicke über die gesamte Wickellänge aufweisen und daß keine leitenden Einschlüsse vorhanden sind. Die Fertigungstechnologie stellt Ansprüche an die mechanische Festigkeit und muß darauf achten, daß keine Randbeschädigungen der Papierrollen vorliegen, sonst reißt die Papierbahn fortwährend während des Wickelvorganges. Man erkennt, daß die hier aufgezeigten Fakten in erster Linie den Hersteller interessieren, der Verbraucher von Bauelementen möge es als Information betrachten.

Als Kondensatorelektroden sind prinzipiell alle leitfähigen Stoffe geeignet, die sich in genügend dünne Folien auswalzen lassen.

Gegenwärtig wird wohl nur Aluminium hoher Reinheitsgrade in Foliendicken von etwa $5\text{---}8\mu\text{m}$ angewendet.

Auf Spezialwickelmaschinen werden Papier- und Metallfolien zu Rund- oder Flachwickeln verarbeitet; je nach den Anforderungen an die Spannungsfestigkeit der Kondensatoren wickelt man mit 2 - 8 Lagen Papier.

Bei Kondensatoren größerer Kapazitätswerte werden häufig mehrere Wickel in einem Gehäuse untergebracht, zu diesem Zweck werden die Wickel formgepreßt. An den Wickelvorgang schließt sich ein Trocknungs- und Imprägnierprozeß an. Dem Trocknungsprozeß kommt ganz besondere Bedeutung zu, denn das Papier ist stark hygroskopisch, und vom Feuchtegrad des Papierees hängt wesentlich die Qualität des Kondensators ab. Eine Beeinflussung erfahren Isolationswiderstand, Verlustfaktor und Durchschlagsfestigkeit. Mit Hilfe von Imprägniermitteln verbessert man die Qualität des Dielektrikums ganz beträchtlich. Zur Imprägnierung werden unter anderem Vaseline, Spezialwachs, Epoxydharz und Mineralöle verwendet. Wird das Papier mit Epoxydharz imprägniert, so bezeichnet man diese Kondensatoren als "Duroplast-Kondensatoren". "Gewaplast-Kondensatoren" werden mit Spezialwachs imprägniert. Die aufgeführten Imprägniermittel haben durch fortlaufende Verbesserungen derzeit eine so hohe Güte erreicht, daß durch sie eine beträchtliche Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit erzielt wird. Die Imprägnierung erfolgt gewöhnlich im Feinvakuum; Lufteinschlüsse im Wickel werden weitestgehend vermieden, dadurch ist keine Schichtung von Luft und festem Dielektrikum vorhanden, und die Gefahr des Durchschlagens ist weiter vermindert. Nach Fertigstellung der Wickel erfolgt deren Einbau in die vorgesehenen Gehäuse. Der Formenreichtum der Gehäusetypen ist groß. Die Rundwickel werden in Rohre verschiedensten Materials eingebaut und vorwiegend als freitragende Bauelemente hergestellt. Kondensatoren größerer Kapazitätswerte baut man in prismatische

Blechbehälter ein, die man dann als Becherkondensatoren bezeichnet. Die verschiedenen Ausführungsformen lassen sich in zwei Gruppen einordnen, in eine Normalsausführung und in eine dichte Ausführung. Unterscheiden kann man beide Ausführungen nach der Art des Schutzes gegen Umwelteinflüsse. Während die Normalsausführung für "normale" Beanspruchung, hinsichtlich Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen, vorgesehen ist, ist die dichte Ausführung höheren Anforderungen gewachsen. Der Abschluß gegen die Umwelt wird bei der Normalsausführung durch Vergießen mit Spezialwachs, bitumenähnlichen Massen oder mit Epoxydharz erzielt. Die Ausführung "dicht" hat in jedem Fall dichtgelötete Gehäuse, die bei den freitragenden Formen Keramik- oder Metallrohre sind, und bei den Bechertypen die prismatischen Blechgehäuse mit Korrosionsschutz.

Dichte Kondensatoren werden gewöhnlich als tropenfest bezeichnet, wobei die Festlegungen in den Standards zu beachten sind.

In jedem Fertigungsprozeß sind Stationen der Prüfung eingeschaltet. Eine Prüfung findet zum Beispiel nach der Fertigstellung der Wickel statt, eine andere erfolgt nach der Endfertigstellung. Werden die geprüften Exemplare für brauchbar befunden, so erfolgt nunmehr die Kennzeichnung auf dem Gehäuse, und der Kondensator kann zum Verbraucher gelangen.

1.1.2. Ausführungsformen - Elektrische Werte - Anwendung
Papierkondensatoren gibt es in den verschiedensten Ausführungsformen und für verschiedenartige Anwendungen. Die Haupteigenschaften werden durch das Dielektrikum bestimmt. Bei einzelnen Typen wendet man besondere Maßnahmen an, um bestimmte Eigenschaften hervorzuheben. In den folgenden Bildern sollen die Einflüsse von Temperatur und Frequenz auf die Parameter der Kondensatoren dargestellt werden.

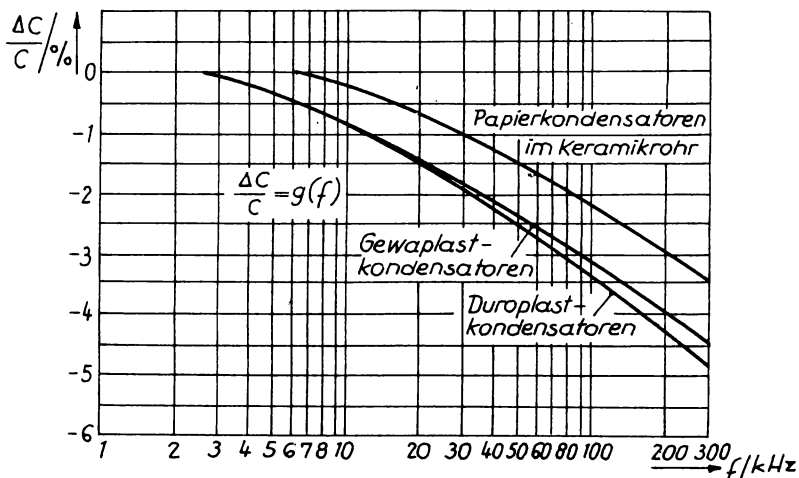


Bild 1.1 Relative Kapazitätsänderung als Funktion der Frequenz bei Papierkondensatoren /1/

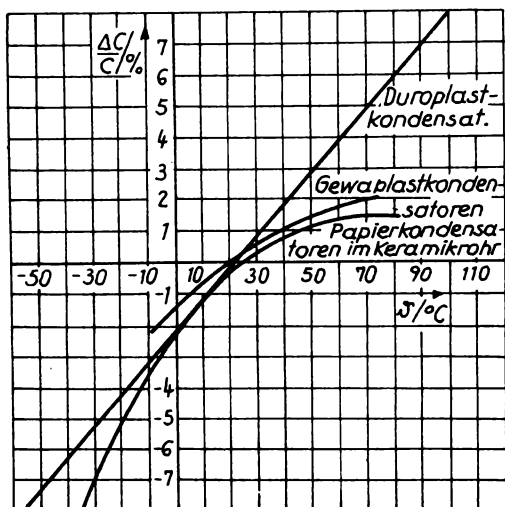


Bild 1.2 Relative Kapazitätsänderung als Funktion der Temperatur bei Papierkondensatoren /1/

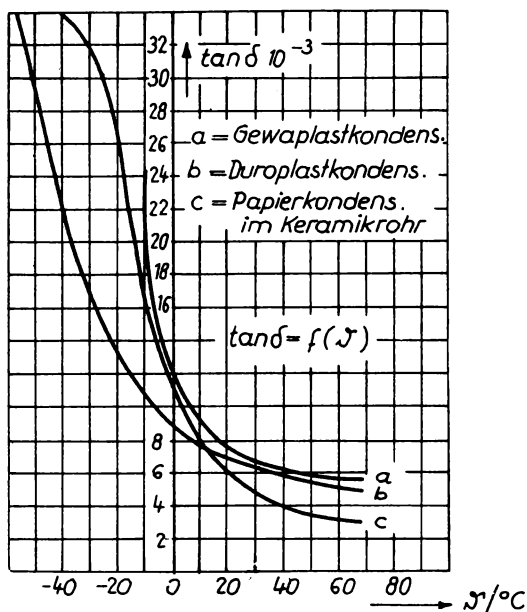


Bild 1.3 Verlustfaktor als Funktion der Temperatur bei Papierkondensatoren /1/

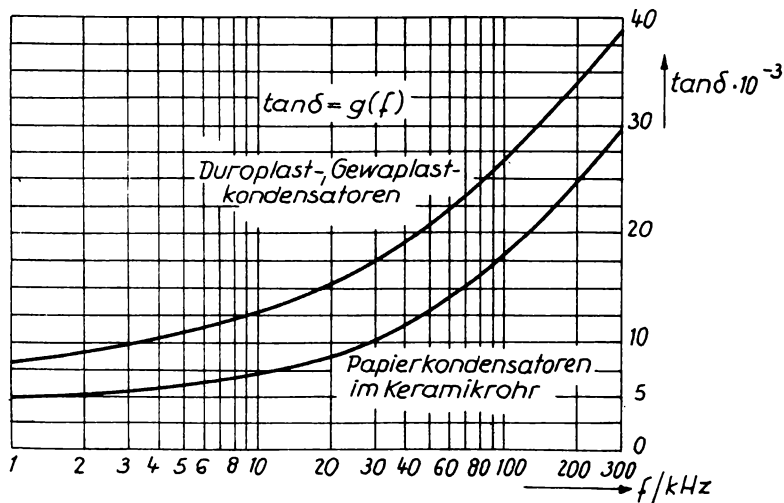


Bild 1.4 Verlustfaktor als Funktion der Frequenz bei Papierkondensatoren /1/

Obwohl es sich bei der Darstellung verschiedener Parameter um Kondensatoren mit gleichem Dielektrikum handelt, lassen sich bereits einige Abweichungen feststellen. Diese resultieren aus verschiedenen Herstellungsformen und vor allem aus der Verwendung verschiedener Imprägniermittel. Entwickler und Konstrukteure haben also bereits bei der Festlegung einer bestimmten Kondensatorentype ihre Entscheidung hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften und des Preises zu treffen.

Von der äußeren Form her lassen sich zwei Gruppen unterscheiden. Einmal sind es die Kondensatoren, die in großen Stückzahlen in der Gerätetechnik verwendet werden und hauptsächlich geringere geometrische Abmessungen besitzen. In eine zweite Gruppe kann man die Großkondensatoren einreihen, zu denen vor allen Dingen Leistungs- und Phasenschieberkondensatoren gehören.

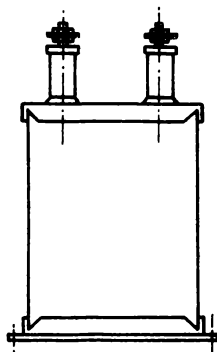
Bei den Kleinkondensatoren findet man eine Anzahl sogenannter freitragender Ausführungen, bei denen die elektrischen Anschlußdrähte gleichzeitig die mechanischen Befestigungselemente sind. Diese Art der Befestigung ist nur für Kondensatoren geringer Masse geeignet. Gewaplast- und Duroplast-Kondensatoren gehören in diese Gruppe. Bei dieser Art von Kondensatoren spricht man von einer gehäuselosen Ausführung, weil ihre Schutzumhüllung nur ein Hartpapierrohr ist, das an den Stirnseiten vergossen wird; es handelt sich also um Kondensatoren in Normalausführung. Die unterschiedlichen Verwendungszwecke machen unterschiedliche Varianten der gleichen Kondensatorenart erforderlich. Unter den Duroplast-Kondensatoren findet man eine "Liliput"-Form, die besonders für die Transistortechnik vorgesehen ist.

Die Nennspannung von 63 V gestattet es, ein einlagiges Dielektrikum zu verwenden, wodurch eine große Kapazität pro Volumeneinheit erzielt werden kann. Die Technik gedruckter Schaltungen bedient sich gern der Duroplast-Kondensatoren mit "Stiften", bei denen die Anschlüsse einseitig herausgeführt werden, um bei Leiterplatten raumsparend arbeiten zu können. Zu den dichten Kondensatoren zählen die Ausführungen "k" und

"d", deren Bedeutung bereits erläutert wurde. Weiterhin kommen hierzu die Kondensatoren größerer Kapazitätswerte in prismatischen Blechgehäusen mit der Bezeichnung Papierkondensatoren M. Dabei werden die Bauformen A,B,C unterschieden, um die Möglichkeiten der Montage mit Befestigungslaschen zu kennzeichnen.

Hochspannungskondensatoren gibt es nur in der dichten Ausführung, da als Imprägniermittel Öl verwendet wird. Die Bechertypen sind mit Befestigungslaschen ausgestattet, und die elektrischen Abschlüsse werden mittels keramischer Isolatoren durch die Gehäusewand geführt. Bei den Rohrtypen sind Boden und Deckel mit Gewindebolzen versehen, die sowohl der mechanischen Befestigung als auch der elektrischen Verbindung dienen. Diese Kondensatoren kann man also nicht einfach auf das Chassis oder die metallische Wand eines Gerätes montieren, man muß gegebenenfalls isolieren, und zwar hochspannungssicher. Eine Befestigung der Hochspannungsrohrkondensatoren mit metallischen Schellen ist nicht statthaft, weil dadurch der Außenkriechweg verkürzt wird.

In den Bildern 1.5 und 1.6 sind die Ausführungen der Hochspannungskondensatoren skizziert.



**Bild 1.5 Becherkondensator, dichte Ausführung
(Hochspannung)**



Bild 1.6 Rohrkapazitor,
dichte Ausführung
(Hochspannung)

Die bisher besprochenen Papierkapazitoren von kleineren geometrischen Abmessungen sind vor allem in der Gerätetechnik zu finden; im folgenden sollen die Kapazitoren der Gruppe zwei näher untersucht werden.

Die zu der Gruppe zwei gehörenden Kapazitoren sind einmal die Motor- bzw. Leistungskapazitoren für Netzfrequenzen, zum andern Leistungskapazitoren für höhere Frequenzen und zum dritten die sogenannten Hochleistungs-Glättungs-Kapazitoren, die mit Hochspannung betrieben werden können. Alle hier genannten Kapazitoren sind in dichten Gehäusen untergebracht und werden mit einem flüssigen Imprägniermittel (Öl und chlorierte Diphenyle) imprägniert. Die Gehäuse sind gewöhnlich Stahlblechkonstruktionen, dichtgeschweißt und mit dichtgelöteten Durchführungen versehen. Besonders große Kapazitoren werden mit verschraubbaren Deckeln ausgestattet. Die Massen der Großkapazitoren liegen zum Teil bei etwa 20 kg, andere bei 50 kg und die Extremwerte steigen bis nahe an die 200 kg Grenze auf.

Nimmt man noch die Kapazitoren für Entstörzwecke hinzu, so hat man einen vollständigen Überblick über die Papierkapazitoren. Entstörkapazitoren sind allerdings nicht nur unter

den Papierkondensatoren zu suchen.

Nach diesem Überblick sollen jetzt die elektrischen Werte und die Anwendungsmöglichkeiten nach Abschnitt 1.0. untersucht werden.

Fragt man zunächst nach der Kapazität, so findet man die Kleinstwerte bei 100 pF und die Größtwerte bei einigen Hundert μF , damit findet man Papierkondensatoren fast im gesamten technischen Kapazitätsbereich. Die Stufung der Kapazitätswerte erfolgt nach den von der IEC empfohlenen E-Reihen. Im Laufe der Zeit hat sich herausgestellt, daß die Stufung nach geometrischen Reihen eine optimale Ausnutzung des Wertespektrums ergibt. Für die Elektronik kommen die Reihen E 6, E 12, E 24 und E 48 in Frage.

Als Grundreihe hat man E 6 anzusehen, die auf folgende Weise entsteht:

Die Unterteilung einer Dekade genügt, da man durch Multiplikation mit entsprechenden Zehnerpotenzen jeden beliebigen Wert darstellen kann. Es ist die Aufgabe zu lösen, zwischen die Zahlen 1 und 10 weitere fünf Zahlen so einzufügen, daß eine geometrische Folge entsteht.

Glied :	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Zahl :	1	?	?	?	?	?	10
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	

Man sieht, eine Dekade wird in sechs Schritte zerlegt.

Für die geometrische Folge gilt:

$$a_k = a_1 \cdot q^{k-1} \quad ; \quad \text{damit wird}$$

$$q = \sqrt[n-1]{\frac{a_n}{a_1}} = \sqrt[7-1]{\frac{a_7}{a_1}} = \sqrt[6]{\frac{10}{1}} = \underline{\underline{1,47}} \quad .$$

Um die Zahlenwerte der geometrischen Folge zu erhalten, multipliziert man den vorhergehenden Wert mit q und rundet.

Für die Reihe E 6 findet man danach:

E 6:	1	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8
------	---	-----	-----	-----	-----	-----

Wie man nun zu den anderen genannten Reihen kommt, dürfte an Hand dieser Rechnung klar sein. E 24 heißt dann also nichts anderes, als daß man die Dekade in 24 Schritte zu unterteilen hat; die nächsthöhere Reihe findet man jeweilig durch Einschieben eines neuen Wertes zwischen zwei schon vorhandene, so daß die geometrische Reihe erhalten bleibt. Streng genommen handelt es sich hier um geometrische Folgen, aber die sehr verbreitete Bezeichnung lautet "Reihen". Zum Schluß soll die Reihe E 48 aufgeführt werden.

E 48:	1	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	(1)
	1,05	1,55	2,3	3,45	4,9	7,15	(2)
	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5	(3)
	1,15	1,7	2,55	3,75	5,35	7,85	(4)
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	(5)
	1,25	1,9	2,85	4,1	5,9	8,6	(6)
	1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1	(7)
	1,4	2,1	3,15	4,5	6,5	9,55	(8)

Streicht man die Zeilen 2,4,6,8, so erhält man die Reihe E 24. Streicht man zusätzlich die Zeilen 3 und 7, so entsteht E 12, und streicht man nun noch Zeile 5, dann bleibt als Zeile $\uparrow$ die Reihe E 6 übrig.

Eine Stufung der Kapazitätswerte nimmt man immer in Verbindung mit den Toleranzen vor; denn es ist sinnlos, grobto-lerierte Bauelemente fein zu unterteilen. Man kann sich an folgende Daten halten:

$\pm 20\% \rightarrow E 6$, $\pm 10\% \rightarrow E 12$, $\pm 5\% \rightarrow E 24$, $\pm 2\%$ und kleiner $\rightarrow E 48$.

Die Toleranzwerte der Papierkondensatoren liegen bei $\pm 20\%$ und bei $\pm 10\%$, so daß man meist mit den Reihen E 6 und E 12 auskommt.

Kondensatoren der Gerätetechnik werden in folgende Spannungsbereiche unterteilt:

U_N / V 63 ; 160 ; 250 ; 400 ; 630 ; 1000 ; 1600 .

Für die Hochspannungskondensatoren heißt die Reihe der Nennspannungen:

U_N/kV 2; 3,2; 4; 6,3; 10; 12; 16; 18; 20; 35.

Damit wäre der Regelfall festgelegt; jedoch gibt es bei den vielen verschiedenen Ausführungen immer wieder Abweichungen, und die muß man aus den Standards oder den Prospekten der Hersteller entnehmen. Geprüft werden Papierkondensatoren meist mit der 3 fachen Nennspannung, allerdings gibt es auch hier abweichende Werte.

In einem im Betrieb befindlichen Kondensator wird fortlaufend Verlustleistung umgesetzt, die den Kondensator erwärmt. Temperaturen bis zu $40^{\circ}C$ werden als unkritisch angesehen; darüber hinaus muß man die Betriebsspannung reduzieren. Die Nennspannung geht dann über in die sogenannte Dauergrenzspannung, wobei gilt:

/2/

Kondensatortemperatur/ $^{\circ}C$	bis + 40	+55	+70	+85	+100
Dauergrenzspannung U_g	$1 \cdot U_N$	$0,94 \cdot U_N$	$0,86 \cdot U_N$	$0,65 \cdot U_N$	$0,3 \cdot U_N$

Bei reiner Gleichspannungsbelastung vertragen Papierkondensatoren

dauernd ----- U_g

während 6 h je Tag ----- $1,05 \cdot U_g$

während einer Minute in großen

Zeitabständen ----- $1,25 \cdot U_g$

Überspannungsspitzen

von 0,01 s Dauer ----- $2 \cdot U_g$

/1/

Geht man zum Betrieb mit Wechselspannungen über, dann muß man zunächst einmal feststellen, was in den Datenblättern steht. Für die sogenannten Netzfrequenzen von 50 Hz findet man Angaben über den Effektivwert der zulässigen Wechselspannung. Steigt die Frequenz, so gelten für Sinusspannungen folgende

Richtwerte:

$$\begin{aligned} f &= 50 \text{ Hz } 0,2 \cdot U_g, \text{ bzw. Werte der Datenblätter} \\ f &= 100 \text{ Hz } 0,15 \cdot U_g \\ f &= 1000 \text{ Hz } 0,03 \cdot U_g \\ f &= 10000 \text{ Hz } 0,01 \cdot U_g \end{aligned} \quad //$$

Ist einer Gleichspannung eine Wechselspannung überlagert, dann darf die Summe aus Gleichanteil und den Amplituden der Wechselspannungen die Dauergrenzspannung nicht überschreiten. Für die Prüfung der Kondensatoren, die mit Wechselspannung betrieben werden, gibt es verschiedene Vorschriften, die man den technischen Datenblättern entnehmen muß.

Die hier aufgezeigten Angaben sollen in erster Linie eine Anregung sein, an welche Fakten beim Einsatz der Kondensatoren zu denken ist. Die Werte selbst sind immer an die jeweilig gültigen Standards gebunden, so daß die hier gemachten Angaben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und zeitlose Exaktheit erheben können.

Die Dielektrizitätskonstanten sind bei Papierkondensatoren recht unterschiedlich, was auf die verschiedenartigen Imprägniermittel zurückzuführen ist. Die Kondensatorpapiere weisen Dk-Werte von 1,8 ... 2,6 auf, bei imprägnierten Papieren sind es Werte um 3 ... 6; gemeint ist die relative Dielektrizitätskonstante. Bei verschiedenen Autoren findet man mitunter allerdings stark voneinander abweichende Angaben, so daß man in Zweifelsfällen vorteilhaft mit dem Hersteller der Bauelemente Verbindung aufnimmt.

Der Verlustfaktor wird für Papierkondensatoren gewöhnlich bei 800 Hz und 20 °C gemessen und besitzt dann Werte $\tan \delta \leq 10 \cdot 10^{-3}$. Bei der allgemeinen Untersuchung des Verlustfaktors wurde bereits auf die Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz verwiesen; man betrachte hierzu die Bilder 1.3 u. 1.4. Als ein direktes Gütemaß ist die Zeitkonstante anzusehen, sie bewegt sich bei Papierkondensatoren je nach den Prüfklassen von etwa 200 s bis 5000 s. Dichte Ausführungen und größere Kapazitätswerte weisen dabei die größeren Zeitkonstanten auf.

Über den Temperatur- und Frequenzgang geben die Bilder 1.1 und 1.2 Aufschluß.

Für die Alterung sind in den entsprechenden Prüfklassen ganz bestimmte Bedingungen festgelegt. Über eine Lagerungs- oder Betriebszeit von etwa 3 Jahren betragen die Kapazitätsabweichungen ungefähr $\pm 5\%$.

Auf eine besondere Kennzeichnung der Kondensatoren sei noch hingewiesen. Die Außenbelagsfolie, die für Abschirmungs- und Erdungsfragen eine Rolle spielen kann, wird auf dem Gehäuse durch einen schwarzen Ring oder Strich kenntlich gemacht. Fehlt dieses Merkmal, dann liegt die Außenfolie an dem Anschluß, der sich rechts neben der Beschriftung befindet. Verständlicherweise gilt diese Regelung für Kondensatoren mit nichtmetallischer Umhüllung, dann jedoch nicht nur für Papierkondensatoren.

Die technischen Parameter der Papierkondensatoren dürften damit ausreichend beschrieben sein, was nicht heißen soll, daß alle Angaben, die der Hersteller zu machen in der Lage ist, hier untergebracht wurden. Auf das Anführen spezieller Standards wurde bewußt verzichtet, da jeweilig nur der mit dem neuesten Datum gültig ist.

Für welche Zwecke setzt man nun Papierkondensatoren ein? Papierkondensatoren findet man in der gesamten Elektrotechnik, so in der Gerätetechnik, in der Fernmeldetechnik, in der Informations-, Meß-, Regelungstechnik und in der Unterhaltungselektronik. Sie erfüllen Aufgaben als Koppel-, Sieb-, Entstörkondensatoren und als Kondensatoren für Kompensationszwecke. Werden Geräte, die mit Kondensatoren ausgestattet sind, in gepflegten Räumen betrieben, dann genügt es, die Normalsausführung zu wählen. Diese Kondensatoren zeichnen sich durch Preisgünstigkeit aus und erfüllen für die genannten Aufgaben hervorragend ihren Zweck. Die dichten Ausführungen sind besser geschützt gegen den Einfluß der Feuchtigkeit und der Temperatur, sie eignen sich deshalb für den Einsatz unter den härteren Bedingungen bei der Luft- und Schifffahrt und in den Tropen und Polargebieten.

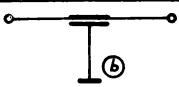
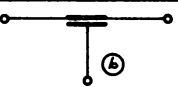
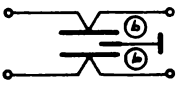
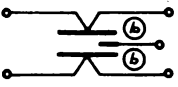
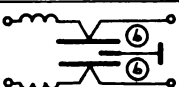
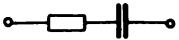
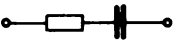
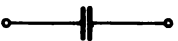
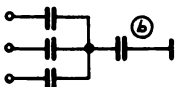
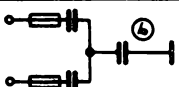
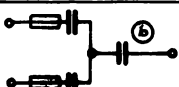
Die bisher aufgeführten Kondensatoren sind für einen Einsatz bei Gleichspannung oder stark reduzierter Wechselspannung vorgesehen. Die nun folgenden sind speziell für den Einsatz bei Wechselspannungen gedacht.

Für die Probleme der Funkentstörung ist ein reichhaltiges Sortiment an Kondensatoren bereitgestellt. Es ist hier natürlich nicht möglich, die Fragen und Belange der Funkentstörung zu klären; es sollen lediglich Anregungen gegeben werden, für welche Zwecke die Entstörmittel zu verwenden sind.

Verschiedene Betriebe der Bauelementeindustrie haben Entstörberatungsstellen eingerichtet, die kostenpflichtig Entstörvorschläge ausarbeiten. Entwickler und Konstrukteure sollten sich bereits während der Konstruktionsarbeiten informieren, was für die Entstörung zu tun ist. Nachträgliche Änderungen an Geräten sind zeitaufwendig und kostspielig! Jedes störende Erzeugnis erbringt andere Werte der Störspannung. Um wirtschaftlich zu entstören, sind Messungen am Gerät unerlässlich; aus den technischen Daten allein lassen sich die Entstörmaßnahmen nicht festlegen. Allgemeine Aussagen über die Probleme der Entstörung lassen nicht gut machen, da man die typischen Eigenarten des "Störers" kennen muß. Da die Entstörkondensatoren hauptsächlich in den Niederspannungsnetzen der Frequenz 50 Hz und der Spannungen 220 V und 380 V eingesetzt werden, sind es Wechselspannungskondensatoren mit entsprechend zugeschnittenen Nennspannungen.

Der Vollständigkeit halber sollen hier noch die Kraftfahrzeug- und Zündkondensatoren genannt werden, die ebenfalls zu den Entstörmitteln gehören. In diesem Kapitel ist die Rede von Papierkondensatoren; unter den Entstörkondensatoren sind jedoch auch einige Metallpapier-Kondensatoren, die im folgenden Kapitel behandelt werden. Einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Entstörmittel gibt Bild 1.7

Für Kompensations- und Glättungszwecke steht weiterhin eine beträchtliche Anzahl von Kondensatoren zur Verfügung.

Kondensatorenart	Schaltbild		Bemerkungen Sonderheiten
	Gehäusetypen	freitragend	
Durchführungs- kondensatoren			
			Kondensator für Berührungsschutz (b)
			Breitbandkondensa- tor mit Berührungs- schutzkapazität
			Breitbandkondensa- tor mit zwei Drosseln und Berührungs- schutzkapazität
Funkenlöschkon- densatoren			
Störschutzkon- densatoren			Einfachkapazi- täten
			Mehrfachkapazi- täten mit Berüh- rungsschutzkapazität
			Mehrfachkapazi- täten
			Mehrfachkapazitä- ten mit Sicherungen und mit Berührungs- schutzkapazität
			Mehrfachkapazi- täten mit Sicherungen
			Mehrfachkapazitä- ten mit Sicherungen und mit Berührungs- schutzkapazität

Motor- oder Leistungskondensatoren werden hauptsächlich zum Anlassen von Einphaseninduktionsmotoren, zur Erzeugung einer Hilfsphase, zweitens zum Betreiben von Drehstrommotoren an Einphasennetzen und drittens zur Blindleistungskompensation eingesetzt. Die grundsätzlichen Schaltungen sind in den Bildern 1.8 bis 1.11 dargestellt.

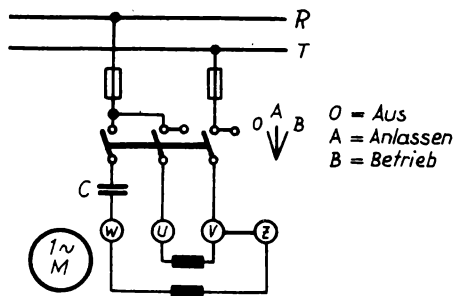
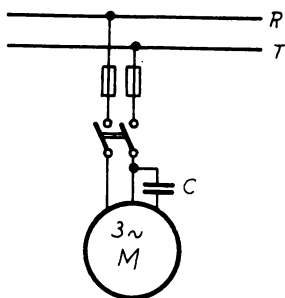


Bild 1.8 Einphasenmotor mit Hilfsphase und Anlaßkondensator



Drehstrommotoren an Einphasennetze

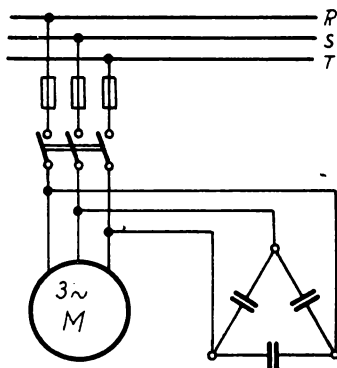


Bild 1.10 Kompensierter
Drehstrommotor

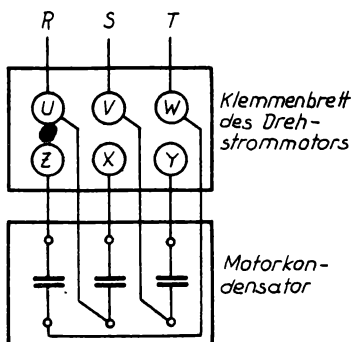


Bild 1.11 Schaltung der Motor-
kondensatoren

Motorbetriebskondensatoren sind Kondensatoren kleinerer Kapazitätswerte und kleinerer geometrischer Abmessungen, die in einphasiger Ausführung die Erzeugung von Hilfsphasen ermöglichen. Über die Kapazität des zu verwendenden Kondensators entscheiden die Spannung, die Leistung und das Drehmoment des

Motors. Erfahrungsgemäß rechnet man mit etwa $70 \mu F$ pro Kilowatt Motorleistung bei 220 V und 50 Hz Netzfrequenz. Für andere Fälle kann man sich nach folgender Formel richten:

$$C/\mu F = \frac{10^9 \cdot P/kW}{(U/V)^2 \cdot \omega/s^{-1}}$$

Die Nennspannung der Motorkondensatoren stimmt mit der Nennspannung des Motors nicht überein, da der Kondensator mit Teilen der Motorwicklung in Reihe geschaltet ist; sie muß aber so ausgelegt sein, daß unter Nennbedingungen die Spannung über dem Kondensator seine Nennspannung nicht übersteigt. Weiterhin ist darauf zu achten, daß ein Reihenschwingungskreis entsteht, bei dem eine Spannungsüberhöhung über den Blindschaltelementen (Kondensator, Motorwicklung) auftreten kann. Für Dauerbetrieb sind Motorkondensatoren mit der angegebenen Nennspannung belastbar, für aussetzenden Betrieb ist $1,5 \cdot U_N$ zulässig. Unter der Bezeichnung Leistungs-Kondensatoren findet man eine Reihe der Blindleistungen von 1---5 kVA_r und eine zweite von 6 und 10 kVA_r, allerdings gibt es auch solche wesentlich höherer Blindleistungen. Die Bezeichnung macht klar, daß es sich hier um die sogenannten Phasenschieber-Kondensatoren handelt, wobei man die der Reihe 1---5 kVA_r Kleinphasenschieber-Kondensatoren nennt. Die prinzipiellen Schaltungen sind in den Bildern 1.10 u. 1.11 sehen. Der Vorteil der Kleinphasenschieber-Kondensatoren besteht darin, daß alle Kondensatorenanschlüsse auf Klemmen herausgeführt sind. Dadurch sind alle Schaltvarianten möglich, die sich bei der Kompensation von Drehstrommotoren ergeben. Im Bild 1.11 ist besonders an die Stern-Dreieck-Umschaltung gedacht, bei der in jedem Fall die Kondensatoren parallel zu den einzelnen Wicklungen des Motors liegen. Eine Kompensation erfolgt in beiden Schaltstellungen, wie auch im Moment des Einschaltens, was besonders für die Berechnung des Blindstromtarifes von Bedeutung ist. Weiterhin ist eine sichere Entladung der Kondensatoren in ausreichend kurzer Zeit gewährleistet, da auch nach der Trennung des Motors vom

Netz die Wicklungen parallel zu den Teilkapazitäten liegen. Die Kondensatoren der Reihe 6 und 10 kVA sind zum Teil dreiphasig ausgeführt und dabei im Dreieck geschaltet. Für Motoren, die mit Stern-Dreieck-Schalter angelassen werden, sind derartige Kondensatoren nicht gut geeignet. Schaltet man sie an die Klemmen U, V, W, so besteht die Gefahr, daß beim Umschalten von Stern auf Dreieck durch die kurzzeitige Trennung vom Netz die Kondensatorenrestspannung in Phasenopposition zur Netzspannung steht. Demnach addieren sich die Spannungen, was die Zerstörung der Kondensatoren oder Schalter zur Folge haben kann. Schließt man dagegen den Kondensator an die Klemmen X, Y, Z an, so ist der Kondensator während des Anlaufs kurzgeschlossen und die Anlaufspitze kann nicht kompensiert werden.

Ist eine kurzfristige Entladung der Kondensatoren durch die Schaltungsmaßnahmen nicht sichergestellt, so können von den Herstellern Entladewiderstände mitgeliefert werden, die innerhalb einer Minute die Kondensatorspannung auf ungefährliche 50 V herabsetzen.

Phasenschieber-Kondensatoren werden für die in Niederspannungsnetzen üblichen Spannungswerte 220 V, 380 V und 500 V gefertigt und können dauernd mit 10% Überspannung betrieben werden. Die Prüfung der Kondensatoren wird auch für diese Fälle mit Gleichspannung durchgeführt, wobei $\frac{4}{3} \cdot U_N$ an die Kondensatorelektroden angelegt wird. Bei der Prüfung der Beläge gegen das Gehäuse arbeitet man mit Wechselspannung, und zwar $2,5 \text{ kV} + U_N$.

Das Zu- oder Abschalten der Phasenschieber-Kondensatoren kann mit einfachen Hebelschaltern oder mit Schaltschützen erfolgen, es ist aber darauf zu achten, daß sie für den 1,5fachen Kondensator-Nennstrom ausgelegt sind. Dämpfungswiderstände für das Einschalten sind nicht erforderlich, da die Leistungs-Kondensatoren unempfindlich gegen Einschaltstromstöße sind; bei der Abschaltung ist aber eine schnelle Entladung des Kondensators nicht zu vergessen.

Leistungs-Kondensatoren haben eine nahezu unbegrenzte Lebens-

daß, sind leicht zu montieren und erfordern keine besondere Wartung. Sie sollen nach Möglichkeit in trockenen Räumen bei Höchsttemperaturen von 35 °C aufgestellt werden. Das Papier-dielektrikum der Leistungs-Kondensatoren wird im Feinvakuum mit Mineralöl oder mit Orophen (Chlordiphenyl - synthetisches Öl) imprägniert. Orophen wartet mit besonders hochwertigen elektrischen Eigenschaften auf, so mit hoher Dielektrizitätskonstante, mit sehr guten Isolationseigenschaften (große Zeitkonstante) und mit hoher Durchschlagsfestigkeit; weiterhin ist Orophen nicht entflammbar. Nachteilige Eigenheiten sind allerdings der plötzliche Abfall der Dielektrizitätskonstanten und der gleichzeitige Anstieg der dielektrischen Verluste bei etwa -5 °C. Die nunmehr einsetzende stärkere Erwärmung macht zwar diesen Vorgang relativ schnell wieder rückgängig, doch ist der Kondensator unter diesen Betriebsbedingungen stärker gefährdet, und es ist ratsam, zu den Mineralöl-Kondensatoren überzugehen.

Eine besondere Art der Kompensations-Kondensatoren stellen die Kondensatoren für Entladungslampen dar. Der augenfällige Unterschied zu den vorher behandelten Kompensations-Kondensatoren liegt in den kleinen geometrischen Abmessungen, was wiederum durch den geringen Leistungsbedarf begründet ist. Es werden zwei Arten gefertigt, Leuchtstofflampen-Kondensatoren und Metolldampflampen-Kondensatoren. Die genannten Kondensatoren sind zunächst einmal für die Kompensation einzelner Leuchten gedacht. Will man zur Gruppenkompensation übergehen, so kann man auch die Motor- oder Kleinphasenschieber-Kondensatoren verwenden.

Eine weitere Art der Leistungs-Kondensatoren sind die sogenannten Mittelfrequenz-Kondensatoren für Frequenzen von 100 Hz bis 10 kHz. Sie dienen der Verbesserung der Leistungsfaktoren in Anlagen der induktiven Wärmeerzeugung beim Schmelzen von Edelmetallen oder zum Härten von Werkzeugen. erinnert man sich des Kapitels 1.0.6. und der Formel für die Verlustleistung, dann wird man feststellen, daß auf Grund der höheren Frequenz und der höheren Spannung (Nennspannungen bis 1600 V), eine

erhöhte Verlustleistung auftreten muß. Die unvermeidliche Folge davon ist eine starke Aufheizung der Kondensatoren, die bis zur Zerstörung führen kann. Eine Intensiv- oder, wie man auch sagt, Fremdkühlung ist unerlässlich. Dem Hersteller ist es gelungen, eine Konstruktion zu entwickeln, die es gestattet, das Kühlmittel (Wasser) direkt an einen Kondensatorbelag heranzuführen. Kühlmittel, Kondensatorelektrode und Kondensatorgehäuse führen das gleiche Potential; aus diesem Grund sind derartige Kondensatoren isoliert aufzustellen. Das Kühlwasser ist den Kondensatoren über genügend lange Sohlleuchte zuzuführen, und der Kühlwasseraustritt darf eine Temperatur von 30°C nicht übersteigen. Fällt die Kühlung aus, so sind die Kondensatoren sofort vom Netz zu trennen.

Zum Abschluß der Betrachtungen über Papierkondensatoren soll noch etwas zu den Anwendungsmöglichkeiten der Hochspannungskondensatoren gesagt werden. Durch die Verwendung von Mineralölen sind diese Kondensatoren wiederum besonders isolationsfest und funktionssicher. Sie werden vorwiegend zur Glättung pulsierender Gleichspannungen eingesetzt, und zwar in Oszillographen, in Fernsehempfängern, in Rundfunksendern und in Eisenbahnnetzen. Für den Aufbau von Kaskadenschaltungen zur Spannungsvervielfachung und in kapazitiven Spannungsteilern werden sie ebenfalls häufig verwendet.

1.2. Metallpapier-Kondensatoren

1.2.1. Aufbau und Herstellung

Der Name eines Kondensators sagt gewöhnlich etwas über das verwendete Dielektrikum aus, demnach handelt es sich hier um das Dielektrikum Papier. Welche spezifischen Unterschiede gibt es nun zu den zuvor behandelten Papierkondensatoren? Dielektrikum ist also das gleiche Natronzellulose-Papier in den bekannten Stärken. An Stelle der metallischen Folien aber werden nunmehr metallische Bahnen auf einen Papieruntergrund aufgedampft. Dielektrikum und leitender Belag bilden eine Einheit und werden im folgenden zu der bekannten Form der Wickelkondensatoren verarbeitet. Die Fertigung der Metallpapier-

Kondensatoren soll etwas näher beschrieben werden, da man daraus für die Anwendung notwendige Hinweise entnehmen kann. Zunächst müssen die Papierbahnen metallisiert werden. In spezielle Bedampfungsanlagen werden geeignet breite Papiere eingebracht und mit einer bestimmten Vorschubgeschwindigkeit hindurchbewegt. Dabei sind die Verdampfer zuvor aufgeheizt und einreguliert worden, so daß der feine metallische Dampfstrahl die vorgesehenen Bahnen trifft. Als Bedampfungsmaterial verwendet man im allgemeinen Zink. Je nach Kapazität und geometrischen Abmessungen benötigt man verschieden breite Beläge. Im Sinne einer wirtschaftlichen Fertigung ordnet man auf einem sehr breiten Papierband mehrere Metallbahnen an, die durch nicht bedampfte Streifen voneinander getrennt sind. Im Bild 2.1 ist eine derartige Anordnung dargestellt.

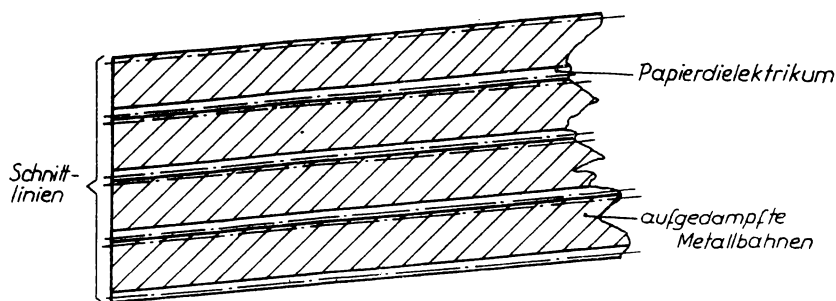


Bild 2.1 Papierdielektrikum mit aufgedampften Metallbahnen

Das Bedampfen erfolgt im Vakuum, und das Papierband wird gegen eine gekühlte Rücklage geführt. Mit Hilfe der Papiergeschwindigkeit und der Dampfstrahldichte (Temperatur des Verdampfers) wird die Dicke des Metallniederschlages beeinflusst. Im Normalfall ist die Belagdicke etwa 10^{-4} mm, die man nicht wesentlich unterschreiten kann; denn es muß ja mindestens eine zusammenhängende Fläche entstehen. Durch elektrische Messungen wird ständig die Gleichmäßigkeit der Belegdicke kontrolliert. Nach dem Bedampfen muß in die einzelnen Bahnen getrennt werden. Die Schnittlinien sind ebenfalls im Bild 2.1

eingezeichnet. Das Schneiden muß mit einiger Sorgfalt erfolgen; denn für die Weiterverarbeitung kommt es darauf an, daß, vor allem im metallisierten Bereich, ein einwandfreier Schnitttrand entsteht. Zwischen den einzelnen Bearbeitungsgängen ist das Zwischenprodukt sorgfältig zu lagern, denn das Papierdielektrikum ist sehr hygroskopisch und kann seine elektrischen Eigenschaften stark verschlechtern. Nachdem soweit vorgearbeitet wurde, kann die Fertigung der Wickel beginnen. Die Anordnung der bedampften Papierbänder ist im Bild 2.2 zu sehen.

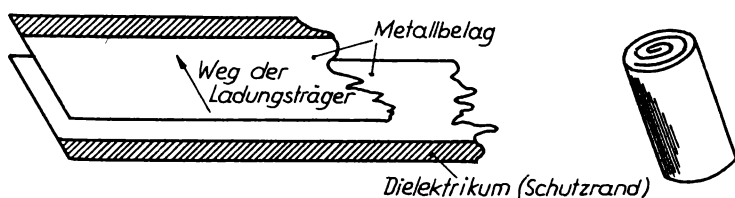


Bild 2.2 Anordnung der Bahnen beim Wickeln und fertiger Wickel

Der nicht bedampfte Papierrand fungiert als Schutzrand, damit beim Wickeln an den Stirnseiten keine leitende Verbindung zwischen den Belägen zustande kommt. Schaut man nun auf die Stirnseite des Wickels, so sieht man eine feine metallische Spirale, die stark vereinfacht im Bild 2.2 skizziert ist. Die Art des Aufbaues macht klar, daß die Ableitung zu den äußeren Anschlüssen mit eingelegten Folien nicht gut möglich und an Punkten völlig ausgeschlossen ist. Auf die Stirnflächen der Wickel wird eine Blei-Zinn-Legierung aufgespritzt; diesen Vorgang nennt man Schoopen. Damit werden die einzelnen Windungen der zuvor beschriebenen metallischen Spirale zu einer geschlossenen Fläche verbunden, gewissermaßen kurzgeschlossen. Bei größeren oder Flachwickeln werden mitunter nur einzelne Brücken gespritzt und an diese dann die Ableitungsdrähte angelötet. Man betrachte hierzu Bild 2.3.

Nach der Fertigstellung des Wickels erfolgt der Einbau in die Gehäuse der unterschiedlichsten Bauformen. Die Metallpapier-

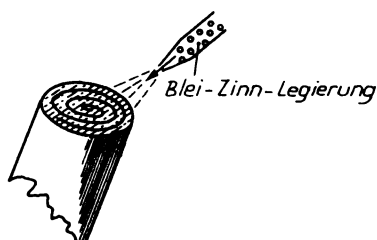


Bild 2.3 Schoopen der Stirnseiten eines MP-Kondensator-Wickels

Kondensatoren kann man rein äußerlich nicht von den Papierkondensatoren unterscheiden, es ist erforderlich, eine Kennzeichnung anzubringen. Die Metallpapier-Kondensatoren erhalten den Aufdruck MP.

1.2.2. Regenerierfähigkeit

Eine Papierbahn größerer Breite und Länge ohne schadhafte Stellen und Löcher herzustellen ist nahezu unmöglich, besonders, wenn sie nur etwa $10\mu\text{m}$ dick ist. Damit keine Schwierigkeiten hinsichtlich der Isolation entstehen, wird bei den Papierkondensatoren mindestens zweilagig gewickelt, damit sind mit großer Sicherheit die Fehlstellen überdeckt. Die aufgezeigte Gefahr ist bei den MP-Kondensatoren noch viel größer. Beim Aufdampfen ergibt sich eine innige Verbindung der feinen Metallteilchen mit dem Papier, die sich natürlich besonders gut in Unebenheiten und schadhafte Stellen hineinschmiegen, was dem Isolationswert nicht gerade zuträglich ist. Eine Vorstellung davon soll das Bild 2.4 vermitteln.

Mißt man nach der Fertigstellung der Wickel den Isolationswiderstand, so zeigen sich nicht gerade Bestwerte. Jetzt schaltet man einen Arbeitsgang ein, den man als "formieren" bezeichnet. Der Wickel wird an leicht überhöhte Nennspannung gelegt, und es bilden sich an den feinen Spitzen große elektrische Feldstärken aus, die im folgenden zum Durchschlag führen können. An Lochstellen ist durch das vorhandene Dielektrikum Luft die Durchschlagsfestigkeit von vornherein stark herabge-

Beim Bedampfen in das Papier eingedrungene Metallspitze (hohe Feldstärke)

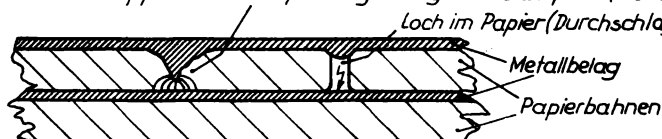


Bild 2.4 Stark vergrößerter Schnitt durch eine Doppellage eines MP-Kondensators

setzt; auch diese Stellen schlagen im allgemeinen durch. MP-Kondensatoren werden mit Hartwachs imprägniert. Durch einen Schrumpfungsprozeß beim Abkühlen entstehen weitere winzige Hohlräume, in denen ebenfalls Luft eingeschlossen ist. An solchen Stellen entstehen leicht Glimmentladungen, die im Laufe der Zeit beträchtliche Erwärmungen, Verkohlungen des Papiers und schließlich thermische Durchschläge bewirken können. Der winzige Lichtbogen verdampft in unmittelbarer Nähe der Fehlerstelle die außerordentlich geringe Metallmasse (μg); durch die Kapillarwirkung und den steigenden Gasdruck wird das Metall von der Fehlerstelle verdrängt, und der Lichtbogen reißt in sehr kurzer Zeit (einige μs) ab, die leitende Verbindung ist also wieder unterbrochen.

Der Energiebedarf für diesen sogenannten Ausheilvorgang ist sehr winzig, da, wie bereits angeführt, nur wenig Metallmasse zu verdampfen ist. Die im Kondensator gespeicherte Energie reicht beim Betreiben eines Kondensators unter Nennbedingungen im allgemeinen für eine größere Anzahl Ausheilprozesse. Liegt der Kondensator an Spannung, so findet durch den Energieverlust ein Nachladevorgang statt. Die dabei auftretenden Ströme sind nun wiederum so geringfügig, daß andere im Stromkreis liegende Bauelemente in keiner Weise schädigend beeinflusst werden. Im Bild 2.5 ist eine Fehlerstelle nach erfolgter Ausheilung skizziert.

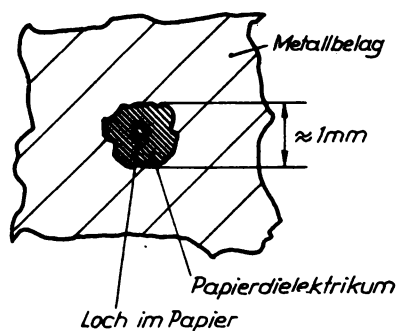


Bild 2.5 Vergrößerte Darstellung
einer Ausheilstelle

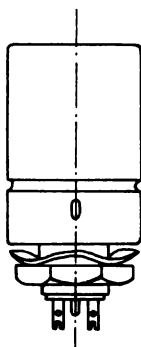
Eine wirkungsvolle Regenerierung bedeutet, daß nach dem Ausheilprozeß der Isolationswiderstand an der Fehlerstelle wieder ausreichend hoch ist. In diesem Sinne darf also das Papierdielektrikum nicht angegriffen werden, es dürfen keine sogenannten Kohlebrücken entstehen. Die Papierdicke verhält sich zur Belagdicke etwa wie 100 : 1. Die wesentlich größere Papiermasse im Fehlerbereich kann die erzeugte Verdampfungswärme aufnehmen, ohne daß kritische Temperaturen für das Papier entstehen. Außerdem wird durch Wärmeleitung die Wärmemenge sofort auf ein größeres Volumen verteilt. Der Endzustand (Bild 2.5) zeigt im Zentrum der Fehlerstelle ein Loch im Papier, das von einer vom Metall befreiten, unbeschädigten Papierfläche umgeben ist, die als winzige Insel innerhalb der großen metallisierten Fläche liegt. Bedenken, daß durch mehrere Ausheilprozesse die Kapazität beträchtlich vermindert werden könnte, zerstreuen sich von selbst, wenn man die Fläche einer Ausbrennstelle mit der Gesamtbelagfläche vergleicht. Bei einer Folienbreite von 40 mm z.B. und einer Wickellänge von 2 m steht eine Fläche von 80000 mm^2 zur Verfügung. Wollte man eine Kapazitätsverminderung von nur 1% herbeiführen, müßte man immerhin 800 mm^2 wegbrennen, was einige hundert Durchschläge

erfordern würde. Die üblichen Toleranzen der MP-Kondensatoren liegen bei mindestens 10%, womit man ermessen kann, welche Bedeutung der Kapazitätsminderung zukommt. Das Regenerieren ist während der Fertigung und während des Betriebes des Kondensators möglich; daraus erkennt man, daß MP-Kondensatoren eine hohe Betriebssicherheit besitzen; dies, die Regenerierfähigkeit-Betriebssicherheit, ist die hervorragendste Eigenschaft der MP-Kondensatoren.

1.2.3. Ausführungsformen - Elektrische Werte - Anwendung
Genau wie bei den Papierkondensatoren stellt man MP-Kondensatoren in normaler und dichter Ausführung her. Die Normalausführung ist gegen die Umgebung mit Gummi oder Epoxydharz abgedichtet, während die dichte Ausführung dicht verlötete Gehäuse besitzt. Zylindrische Ausführungen, sowohl freitragend als auch mit Zentralbefestigung (Siehe Bild 2.6), und Bechertypen werden mit großen Buchstaben gekennzeichnet. Innerhalb der einzelnen Typen gliedert man nach Art der Befestigungs- oder Anschlußmöglichkeiten weiter in sogenannte Bauformen auf.

In prismatischen Gehäusen werden auch Mehrfachkapazitäten untergebracht, bei denen teilweise der gemeinsame Sternpunkt am Gehäuse angeschlossen ist. Bei freitragenden zylindrischen Formen spart man gern eine isolierte Durchführung ein und legt deshalb einen Pol des Kondensators an das Gehäuse. Diese Kondensatoren sind gewöhnlich mit einer isolierenden Kunststoffolie umhüllt. Zu beachten ist die bereits erwähnte Kennzeichnung mit MP, es besteht die Gefahr der Verwechslung mit Papierkondensatoren.

Beim Untersuchen der elektrischen Werte findet man in den Standardblättern für die Spannung 160 V, 250 V, 400 V und 630 V Nennspannung. Die angeführten Nennspannungen sind jeweilig zulässig bis zu einer Kondensatortemperatur von $+40^{\circ}\text{C}$. Bei höher liegenden Temperaturen ist auf die Dauergrenzspannung U_g überzugehen. Es gelten dann die gleichen Festlegungen wie bei den Papierkondensatoren.



**Bild 2.6 MP-Kondensator „D“
mit Zentralbefestigung**

Der Betrieb mit Wechselspannung macht immer Sonderregelungen notwendig. Ist einer Gleichspannung eine Wechselspannung überlagert, dann dürfen die Spitzenwerte folgende Angaben nicht überschreiten:

Dauerbetrieb	-----	$1,0 \cdot U_g$
bis zu 2000 h insgesamt	-----	$1,25 \cdot U_g$
Kurzzeitbetrieb bis zu 1 min	-----	$1,4 \cdot U_g$
Kurzzeitbetrieb bis zu 1 s	-----	$2,0 \cdot U_g$
Kurzzeitbetrieb bis zu 1 ms	-----	$2,5 \cdot U_g$
Kurzzeitbetrieb bis zu 1 μs	-----	$3,0 \cdot U_g$

//

Überhöhte Betriebsspannungen können zum Durchbruch des Dielektrikums führen und den Kondensator zerstören. Steigt dagegen die Frequenz, so wird auch bei relativ kleinen Spannungsamplituden eine starke Erwärmung auftreten. Was in diesem Fall zu tun ist, zeigt die nachstehende Aufstellung

f/Hz	100	300	800	2000	4000	10000
$\frac{U_{Beff}}{U_g}$	0,2	0,1	0,06	0,035	0,025	0,015

//

Häufig werden MP-Kondensatoren bei Netzfrequenzen von 50 Hz benötigt. Für diesen Fall, 50 Hz Sinusform und $+40^\circ C$, kann man aus den Nennspannungen auf die zulässigen Wechselspannungen

gen schließen:

U_N	160 V	250 V	400 V
$U_{B_{eff}}$	75 V	125 V	150 V

/1/

Die verstehenden Zahlenangaben sind wiederum nur zur Orientierung gedacht. In speziellen Fällen sind Frequenz und Spannung zwischen Verbraucher und Hersteller zu vereinbaren.

Früher hat man für die Nennspannung $U_N = 630$ V eine zulässige Wechselspannung von 220 V angegeben. Nach neueren Untersuchungen ist jedoch der Einsatz von MP-Kondensatoren im Dauerbetrieb bei 220 V, 50 Hz nicht ratsam, da Glimmentladungen ihre Löschoannung unterhalb 220 V haben. Es droht hier wiederum der thermische Durchschlag, deshalb verwendet man für Spannungen über 150 V besser Papierkondensatoren. Seit einiger Zeit werden allerdings auch ölprägnierte MP-Kondensatoren hergestellt, bei denen Glimmerscheinungen nicht auftreten. Man hat diese Kondensatoren vor allem für den Einsatz bei 50 Hz und den üblichen Netzspannungen geschaffen.

Auf die Prüfspannung der MP-Kondensatoren muß man besonders aufmerksam machen, sie beträgt $U_P = 1,4 \cdot U_N$. Des Dielektrikums wegen gibt es öfters Irrtümer, denn die Papierkondensatoren werden meist mit 3 facher Nennspannung geprüft. Es handelt sich um die Prüfung Belag gegen Belag; Prüfungen Belag gegen Gehäuse sind in den Unterlagen angegeben.

Das Kapazitätsspektrum reicht von 47 nF bis 40 μ F, allerdings sind die Einzelwerte nicht streng nach den E-Reihen gestuft. Die Kapazitätstoleranz beträgt unterhalb 1 μ F $\pm 20\%$, darüber lassen sich Werte von $\pm 10\%$ einhalten.

Für den Verlustfaktor werden Werte um $10 \cdot 10^{-3}$ angegeben. Die Messungen erfolgen bei 50 Hz oder bei 800 Hz und 20°C.

In den allgemeinen Betrachtungen am Anfang dieses Lehrbriefes wurde der Zusammenhang zwischen Isolationswiderstand und Zeitkonstante aufgezeigt. Die Standardblätter weisen diesbezüglich Werte zwischen 200 s und 1000 s auf, womit die Metallpapier-Kondensatoren an der unteren Grenze der im technischen

Bereich verwendeten Kondensatoren liegen.

Das Temperaturintervall reicht von -55°C (dichte Ausführung) bzw. von -25°C (gummigedichtete) bis zu $+70^{\circ}\text{C}$.

Nun einige Betrachtungen über Kontaktsicherheit und Dämpfungsarmut. Durch das Schoopen erhalten die MP-Kondensatoren an den Stirnseiten große Kontaktflächen, die einen kleinen Übergangswiderstand garantieren. Kontaktsicherheit ist eine der Voraussetzungen für dämpfungsarme Kondensatoren, jedoch gehen alle anderen ohmschen Widerstände ebenfalls ein. Im Bild 2.2 ist der Weg der Ladungsträger eingezeichnet, es ist nur die Breite der Metallschicht zu durchlaufen, wobei als Leiterquerschnitt die Wickellänge multipliziert mit der Schichtdicke zur Verfügung steht. Das ist für den ohmschen Widerstand von besonderer Bedeutung, er wird so klein wie möglich, was im Sinne der Dämpfungsarmut ist. Weiterhin ergibt sich daraus eine kleine induktive Komponente. Mithin kann man also die MP-Kondensatoren als kontaktsicher und dämpfungsarm bezeichnen.

Wo und für welche Zwecke lassen sich nun MP-Kondensatoren einsetzen?

Der Metallpapierkondensator im eigentlichen Sinne ist der einlagig gewickelte, bei ihm kommen die typischen Eigenschaften voll zur Geltung. Neben der Regenerierfähigkeit als der kennzeichnenden Eigenschaft sind die Hauptvorteile kleine geometrische Abmessungen und damit in Verbindung geringes Gewicht. Diese Angaben beziehen sich auf den Vergleich mit Papierkondensatoren. Das Volumen der MP-Kondensatoren beträgt im günstigsten Fall nur noch etwa ein Viertel bis ein Drittel von dem der Papierkondensatoren. Aus Gründen der Spannungsfestigkeit lassen sich einlagige Wickel nur bis etwa 200 V Nennspannung herstellen. Bei den folgenden mehrlagigen Wickeln geht die Volumensparnis rapide zurück. Die Regenerierfähigkeit bleibt aber erhalten, so daß nach wie vor wegen der hohen Betriebssicherheit der MP-Kondensator an den Stellen eingesetzt wird, wo dies von besonderer Bedeutung ist. Hohe Betriebssicherheit ist dort wichtig, wo durch den Ausfall von

Geräten Gefahr für Menschenleben entstehen kann oder wo in der Produktion kostspielige Ausfälle eintreten können. Der Einsatz der MP-Kondensatoren erfolgt z.B. in Steuer- oder Kommandogeräten oder dort, wo die Zugänglichkeit nicht jederzeit gewährleistet ist, etwa in Seekabelverstärkern. Man löst mit ihnen Probleme der Siebung und Entstörung. Die gesamte Nachrichtentechnik hat großen Bedarf an diesen Kondensatoren, und auch im Meßgerätebau werden große Stückzahlen benötigt. Ein Blick auf die Kapazitätswerte zeigt, daß die MP-Kondensatoren auch für Netzteile als Lade- und Siebkondensatoren geeignet sind, auch wenn man mit ihnen das geringe Bauvolumen der Elektrolyt-Kondensatoren nicht erreicht. Die Lebensdauer der MP-Kondensatoren ist sehr gut, allerdings darf man die Forderungen an den Isolationswiderstand und die Kapazitätskonstanz nicht zu hoch stellen. Zusammenfassend kann man feststellen, daß man gegenüber Papierkondensatoren mit Metallfolien einige Vorteile erzielen kann, nämlich: Regenerierfähigkeit, kleines Volumen, geringes Gewicht, lange Lebensdauer und Unempfindlichkeit gegen kurzzeitige Spannungsüberhöhungen.

1.3. Lack-Kondensatoren

1.3.1. Aufbau und Herstellung

Die Ausführungen über Lack-Kondensatoren lassen sich ziemlich kurz fassen, wenn man zunächst feststellt, daß sie zu den ausheilbaren Kondensatoren gehören. Es sind hier also die prinzipiell gleichen Gesetzmäßigkeiten wirksam wie bei den MP-Kondensatoren, es erübrigt sich, diese nochmals zu besprechen. Es genügt, die Unterschiede und die spezifischen Eigenschaften herauszuarbeiten. Zur Kennzeichnung der Lack-Kondensatoren druckt man auf das Gehäuse ein großes L auf. Für Kondensatoren ist der wichtigste Bestandteil das Dielektrikum. Aus dem Namen kann man schließen, daß Lack als Dielektrikum verwendet werden soll. Lacke sind echte oder kolloidale Lösungen von Ölen oder Harzen, bei denen eine Filmbildung, z.B. durch Verdunsten der Lösungsmittel, eintreten soll. Ei-

nen geschlossenen Lackfilm herzustellen ist technologisch nicht ganz einfach, denn der Lack muß zunächst auf einen Träger aufgebracht werden, von dem er für den späteren Wickelprozeß wieder getrennt werden muß. Als Trägermaterial verwendet man hauptsächlich Papier mit einer geeigneten Deckschicht die das Trennen erleichtern soll. Der vorbereitete Lack wird in einer außerordentlichen dünnen Schicht - es gelingt, eine Schichtdicke von wenigen μm zu schaffen - auf den Papierträger aufgebracht. Auf den entstandenen Lackfilm dampft man genau wie bei den MP-Kondensatoren eine hauchdünne Schicht Metall auf. Damit sind die wesentlichsten Vorbereitungen abgeschlossen und das Herstellen der Wickel kann beginnen. Das Lösen von der Trägerschicht erfolgt bei diesem Wickelvorgang. Die weitere Verarbeitung ist so wie bei den MP-Kondensatoren, es folgen noch das Schoopen und der Einbau in zylindrische Metallgehäuse.

1.3.2. Ausführungsformen - Elektrische Werte - Anwendung

L-Kondensatoren werden in zwei Ausführungen für verschiedene klimatische Anforderungen hergestellt. In beiden Fällen handelt es sich um zylindrische Formen, die einmal vergossen und zum anderen dicht verlötet werden; man beachte hierbei die zugehörigen Prüfklassen.

Da die L-Kondensatoren zur Gruppe der regenerierfähigen Kondensatoren gehören, erhebt sich die Frage, welche Besonderheiten sie gegenüber den MP-Kondensatoren besitzen. Im Zuge der Entwicklung der Nachrichtentechnik, der Elektronik, der Meß-, Steuer- und Regelungstechnik wurde es notwendig, immer mehr Bauelemente pro Volumeneinheit unterzubringen. An die diskreten Bauelemente resultierte daraus die Forderung nach ständiger Verringerung ihres Volumens.

Welche Möglichkeiten bestehen bei Kondensatoren, mehr Kapazität pro Volumeneinheit unterzubringen?

Erinnert man sich der Formel für die Kapazität des Plattenkondensators, so erkennt man, daß nur eine Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten oder eine Verringerung der Dicke des

Dielektrikums erfolgversprechend sind. Von besonderem Vorteil ist es natürlich, wenn man beide Möglichkeiten ausnutzen kann, und das ist beim Lack-Kondensator gelungen. Man kann die Dicke der Papierdielektrika beträchtlich unterbieten, und die Dielektrizitätskonstante liegt wesentlich höher als die des Papiers. Das Resultat dieser Bemühungen ist ein ausheilfähiger Kondensator mit hohen Kapazitätswerten pro Volumeneinheit. Die Qualität des Lackes ist vom noch enthaltenen Restlösungsmittel abhängig, von dem der Isolationswiderstand nicht unerheblich beeinflusst wird. Andererseits dringen beim Metallisieren die feinen Metallteilchen in alle Poren und Unebenheiten ein und tragen ebenfalls zur Veränderung des Isolationswiderstandes bei. Bei längerem Betrieb unter Nennbedingungen kann der Isolationswiderstand auf 10% seines Anlieferungswertes zurückgehen. Diese Angaben beziehen sich auf einlagige Wickel; in neuerer Zeit ist es durch die Schaffung mehrlagiger Wickel gelungen, den Isolationswiderstand bedeutend zu stabilisieren. Gefertigt werden L-Kondensatoren für eine Nennspannung $U_N = 63 \text{ V}$ und eine Prüfungsspannung $U_P = 75 \text{ V}$; bei 50 Hz ist ein Einsatz für $U_B = 22 \text{ V}$ zulässig. Der Verlustfaktor, bei 20 °C und 800 Hz gemessen, ergibt Werte $\tan \delta \leq 20 \cdot 10^{-3}$.

Der Temperatureinsatzbereich reicht von -40 °C bis +70 °C. Bei den Angaben der Temperaturbereiche beachte man, daß die untere Grenztemperatur ausschließlich der Eigenerwärmung gilt, während die obere Grenztemperatur einschließlich der Eigenerwärmung zu rechnen ist. Das heißt: Hat ein Kondensator durch eine Umgebungstemperatur von +70 °C seine obere Grenztemperatur erreicht, so darf er praktisch nicht mehr betrieben werden, weil sonst durch den Umsatz an Verlustleistung seine Temperatur weiter steigen würde. Für die untere Grenztemperatur sind die Überlegungen sinngemäß anzustellen.

Der Einsatz der L-Kondensatoren erfolgt prinzipiell so wie der der MP-Kondensatoren, also für Sieb- und Entstörungszwecke. Bauform und Nennspannung deuten darauf hin, daß ein Einsatz vor allem in der Technik gedruckter Schaltungen sowie in der

Transistortechnik erfolgen wird. Man bedient sich ihrer schon in großen Stückzahlen in der Steuer-, Meß- und Regelungstechnik sowie in allen Bereichen der Nachrichtentechnik und der Elektronik.

1.4. Wiederholungsfragen

1. Was versteht man unter Verlustleistung bei Kondensatoren?
2. Was sagt auf Kondensatoren die Kennzeichnung "d" aus und wie lassen sich die mit diesem Begriff ausgedrückten Eigenschaften beeinflussen?
3. Auf welche Weise erreicht man bei Wickelkondensatoren Kontaktsicherheit?
4. Mit welchen Mitteln und aus welchem Grund imprägniert man das Dielektrikum der Papierkondensatoren?
5. Geben Sie an, für welche Zwecke man Papierkondensatoren einsetzt!
6. Welche Vorteile zeichnen MP-Kondensatoren aus?
7. Wodurch unterscheiden sich L-Kondensatoren von den MP-Kondensatoren? Skizzieren Sie den prinzipiellen Aufbau der L-Kondensatoren!
8. Ein Kondensator soll bei einer Wechselspannung von $f = 50 \text{ Hz}$ und $U = 220 \text{ V}$ eingesetzt werden. Welche Kondensatorenart ist geeignet und warum?

1.5. Übungsaufgaben

Aufgabe 1

Rechnen Sie zunächst allgemein und danach mit den gegebenen Zahlenwerten die Reihenschaltung von Kapazität und Widerstand in eine wertgleiche Parallelschaltung um!

$$\omega = 10^5 \cdot s^{-1} \quad R_r = 100 \, \Omega \quad C_r = 50 \, nF$$

Aufgabe 2

Leiten Sie den Verlustfaktor für die Parallelschaltung des Kondensators ab!

Anmerkung: Der Verlustfaktor ist immer der Tangens des Verlustwinkels, und dieser wiederum ist immer die Ergänzung zu 90° vom Winkel der Phasenverschiebung aus gerechnet, mit anderen Worten, es ist der Quotient Wirk- durch Blindkomponente zu bilden.

Aufgabe 3

Welche Werte nimmt der Gesamtverlustfaktor an, wenn:

- 3.1. n Kondensatoren gleicher Kapazität und verschiedenen Verlustfaktors parallelgeschaltet werden?
- 3.2. n Kondensatoren gleicher Kapazität und gleichen Verlustfaktors parallelgeschaltet werden?
- 3.3. wie 3.1. jedoch für Reihenschaltung?
- 3.4. wie 3.2. jedoch für Reihenschaltung?

Aufgabe 4

Kondensatoren verwendet man zur Messung hochohmiger Widerstände sowie zur Kurzzeitmessung.

- 4.1. Ein Kondensator mit $C = 50 \, nF$ ist auf 280 V aufgeladen. Über einen unbekannten Widerstand R_x entlädt er sich in 60 s auf 154 V. Welchen Wert hat R_x ?
- 4.2. Bestimmen Sie die Winkelgeschwindigkeit und die Drehzahl eines schnell rotierenden Stabes mit einem Kurzzeitmesser! (Bild 0.0.4.2) Der rotierende Stab öffnet nacheinander die Schalter S_1 und S_2 . Der statische Spannungsmesser zeigt nach diesem Vorgang eine Spannung von 50 V an.

Die Eigenkapazität des statischen Spannungsmessers ist vernachlässigbar klein gegenüber C.

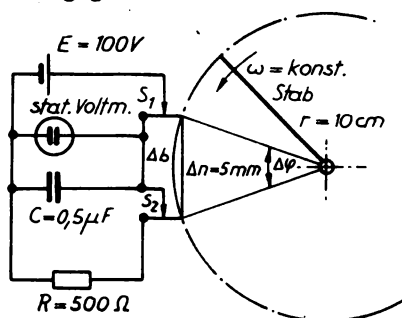


Bild 00.4.2 Kurzzeitmesser

Aufgabe 5

Berechnen Sie die Verlustleistung des Kondensators am Beispiel des Reihenersatzschaltbildes!

Aufgabe 6

Für eine Niederspannungs-Leuchtstofflampe soll eine Blindleistungskompensation durchgeführt werden. Die Leuchtstofflampe 65/100 hat folgende Daten:

Wirkleistung der Lampe ohne Drossel $P = 65 \text{ W}$

Wirkleistung der Lampe mit Drossel $P = 75 \text{ W}$

Die Stromaufnahme beträgt $I = 0,68 \text{ A}$

6.1. Berechnen Sie die Kapazität und die Blindleistung des erforderlichen Kompensationskondensators C_K , wenn der $\cos \varphi$ auf 0,95 verbessert werden soll! Welcher Strom fließt nach erfolgter Kompensation?

6.2. Welchen Wert muß der Entladewiderstand R_E haben, damit nach dem Abschalten die Spannung innerhalb einer Minute auf 50 V abgesunken ist?

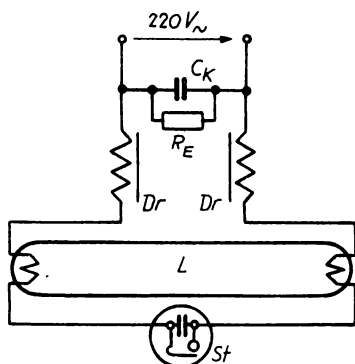


Bild 00.6 Schaltung einer
Leuchtstofflampe mit Kom-
pensationskondensator

1.6. Antworten auf die Wiederholungsfragen

1. Kondensatoren sind keine idealen Schaltelemente, sie besitzen Wirkwiderstände, in denen Verlustleistung umgesetzt wird. Bei Belastung mit reiner Gleichspannung fließt auch nach dem Abklingen des Ausgleichvorganges ein Strom weiter durch den Kondensator. Bildet man das Produkt aus diesem Strom und der über dem Kondensator stehenden Spannung, so gewinnt man ein Maß für die sogenannten Leitfähigkeitsverluste. Beim Betrieb mit Wechselspannung kommen die dielektrischen Verluste hinzu, sie stellen den Aufwand für die ständige Umorientierung der im Dielektrikum befindlichen Dipole dar. Es ist nicht zu vergessen, daß Anschlußdrähte, Kontaktstellen und Folien ohmsche Widerstände besitzen, in denen ebenfalls Verlustleistung umgesetzt werden muß.

Die Gesamtverlustleistung setzt sich aus den genannten Anteilen zusammen und bewirkt eine Erwärmung des Kondensators. Die Erwärmung wiederum bringt eine Änderung der elektrischen Parameter mit sich, welche die Funktionstüchtigkeit von Schaltungen in Frage stellt. Eine extrem starke Erwärmung kann schließlich zur Zerstörung des Kondensators

führen.

2. Der Aufdruck "d" sagt aus, der Kondensator ist dämpfungsarm. Der in ein System eingespeiste Energiebetrag wird zum Teil für die Überwindung der Verlustwiderstände benötigt. Um diesen Anteil klein zu halten, muß man die Verlustwiderstände so klein wie möglich machen. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist die Kontaktsicherheit, oder daß man die Wickel beispielsweise von den Stirnseiten her einspeist. Weiterhin ist die induktive Komponente klein zu halten, was ebenfalls durch stirnseitiges Einspeisen oder auch durch Mittelableitung gelingt.
3. Kontaktstellen weisen Übergangswiderstände auf. Um Kontaktsicherheit garantieren zu können, muß dieser Übergangswiderstand so klein wie möglich sein. Es zeigt sich, daß diese Forderung am besten von stoffschlüssigen Verbindungen erfüllt wird. Man wird dort, wo die Möglichkeit besteht, die Verbindung durch Schweißen oder Löten realisieren. In anderen Fällen legt man eine größere Anzahl Ableitungstreifen ein, um durch große Kontaktfläche und entsprechenden Kontaktdruck das gleiche zu bewirken.
4. Zum Imprägnieren verwendet man Öle (flüssig), Vaseline (halbfest) oder Wachse bzw. Harze (fest). Beim Wickeln der Kondensatoren entstehen mitunter kleine Lufteinschlüsse, so daß ein geschichtetes Dielektrikum wirksam wird. Die Durchschlagsfestigkeit der Luft ist beträchtlich kleiner als die der festen Isolierstoffe, und es kommt dann häufig zu Glimmentladungen an diesen Stellen, die nach einiger Zeit zum thermischen Durchschlag führen können. Durch das Imprägnieren werden die Hohlräume ausgefüllt, und die Durchschlagsfestigkeit ist bedeutend besser geworden.
5. Das Anwendungsgebiet der Papierkondensatoren ist sehr groß. Die Hauptmerkmale für die Anwendung sind Entstörprobleme, Siebzwecke und Koppelkondensatoren. Gut eignen sie sich für die Bewältigung kleiner und großer Kompensationsmaßnahmen. Hierbei kommt vor allem die Spannungsfestigkeit für Wechsel-

spannungen zur Geltung. Entstörprobleme der gesamten Nachrichtentechnik werden hauptsächlich mit Papierkondensatoren gelöst. Es steht ein ganzes Sortiment Hochspannungskondensatoren zur Verfügung, und überhaupt gibt es wohl kaum einen Bereich in der Elektrotechnik, in dem Papierkondensatoren nicht eingesetzt werden. Allerdings muß man daran denken, daß die Anforderungen an den Verlustfaktor nicht allzu hoch sein dürfen.

6. Der Hauptvorteil der MP-Kondensatoren ist die Regenerierfähigkeit. Weiterhin lassen sich anführen: kleines Volumen, geringes Gewicht, Unempfindlichkeit gegen kurzzeitige Spannungsüberlastungen und lange Lebensdauer.
7. Anstelle des Papiers wird Lack als Dielektrikum verwendet. Die sich daraus ergebenden Vorteile bestehen in erster Linie aus beträchtlicher Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten und Verringerung der Dielektrikumsdicke. Das Resultat ist eine große Kapazität pro Volumeneinheit.

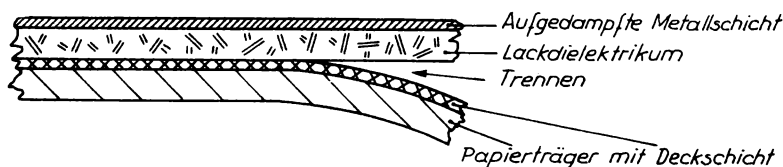


Bild 3.1 Prinzip des L-Kondensators

8. Für die angegebenen Einsatzbedingungen kommen Papierkondensatoren in Frage, Keramik- und Glimmerkondensatoren sind bisher nicht behandelt worden. Auf Grund der Imprägnierung, z.B. mit Öl, treten Glimmerscheinungen bei der kritischen Spannung 220 V nicht auf. Mit Wachs imprägnierte MP-Kondensatoren und L-Kondensatoren kommen aus diesem Grund nicht in Frage. Für einige spezielle Zwecke gibt es jedoch bereits ölprägnierte MP-Kondensatoren; vergleiche hierzu die Lösung zur Aufgabe 6.

1.7. Lösungen zu den Übungsaufgaben

Aufgabe 1



Bild 0.0.1 Umrechnung einer Reihen- in eine Parallelschaltung

$$Z_r = R_r + jX_r$$

$$Y_p = G_p + jB_p$$

$$Y_r = \frac{1}{Z_r} = \frac{1}{R_r + jX_r} \quad G_p = \frac{1}{R_p} \quad B_p = \frac{1}{X_p} = \omega C_p$$

$$= \frac{R_r - jX_r}{R_r^2 + X_r^2} = \frac{R_r}{R_r^2 + X_r^2} - j \frac{X_r}{R_r^2 + X_r^2}$$

$$\underline{Y_r = Y_p}$$

$$\frac{R_r}{R_r^2 + X_r^2} - j \frac{X_r}{R_r^2 + X_r^2} = G_p + jB_p$$

$$G_p = \frac{R_r}{R_r^2 + X_r^2}$$

$$B_p = - \frac{X_r}{R_r^2 + X_r^2}$$

$$R_r^2 + X_r^2 = |Z_r|^2$$

$$\boxed{R_p = \frac{|Z_r|^2}{R_r}}$$

$$\boxed{-X_p = \frac{|Z_r|^2}{X_r}}$$

$$X_r = -\frac{1}{\omega C_r}$$

$$= -\frac{1 \cdot V}{10^5 \cdot s^{-1} \cdot 50 \cdot 10^{-9} As} = \underline{\underline{-200 \Omega}}$$

$$Z_r = R_r + jX_r$$

$$= \underline{\underline{(100 - j200) \Omega}} \quad |Z_r|^2 = (100^2 + 200^2) \Omega^2 = \underline{\underline{5 \cdot 10^4 \Omega^2}}$$

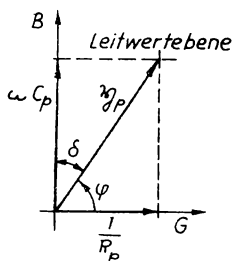
$$R_P = \frac{5 \cdot 10^4 \Omega^2}{10^2 \Omega} = \underline{\underline{500 \Omega}} \quad X_P = \frac{5 \cdot 10^4 \Omega^2}{-2 \cdot 10^2 \Omega} = \underline{\underline{-250 \Omega}}$$

$$C_P = -\frac{1}{\omega \cdot X_P}$$

$$= -\frac{1}{10^5 \cdot s^{-1} \cdot (-250) \Omega} = 40 \cdot 10^{-9} F = \underline{\underline{40 nF}}$$

Aufgabe 2

Man führe die Lösung mit Hilfe der Gaußschen Zahlenebene herbei.



$$Y_P = \frac{1}{R_P} + j\omega C_P$$

$$\tan \varphi = \frac{\omega C_P}{\frac{1}{R_P}} = \omega C_P R_P$$

$$\delta = 90^\circ - \varphi$$

$$\tan \delta = \tan(90^\circ - \varphi) = \cot \varphi$$

Bild 0.0.2 Zum Ver-
lustfaktor

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_P \cdot R_P}$$

Die Lösung läßt sich aus dem Zeigerdiagramm sofort hinschreiben, man sollte bei derartigen Aufgaben immer an das Zeigerdiagramm denken.

Aufgabe 3

Es werden hier die Teilergebnisse aus dem Abschnitt 1.0.4. verwendet.

Parallelschaltung

$$\tan \delta = \frac{C_1 \cdot d_1 + C_2 \cdot d_2 + \dots + C_n \cdot d_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n}$$

Reihenschaltung

$$\tan \delta = \frac{\frac{d_1}{C_1} + \frac{d_2}{C_2} + \dots + \frac{d_n}{C_n}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

3.1.

$$C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$$

$$\tan \delta = \frac{C(d_1 + d_2 + \dots + d_n)}{n \cdot C} = \frac{\sum_{v=1}^n d_v}{n}$$

$$\tan \delta = \frac{\sum_{v=1}^n d_v}{n}$$

3.2.

$$C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$$

$$d_1 = d_2 = \dots = d_n = d$$

$$\tan \delta = \frac{C \cdot d + C \cdot d + \dots + C \cdot d}{C + C + \dots + C} = \frac{n \cdot C \cdot d}{n \cdot C} = \underline{\underline{d}}$$

3.3.

$$\underline{C_1 = C_2 = \dots = C_n = C}$$

$$\tan \delta = \frac{\frac{d_1}{C} + \frac{d_2}{C} + \dots + \frac{d_n}{C}}{n \cdot \frac{1}{C}} = \frac{\frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{C}}{\frac{n}{C}} = \frac{\sum_{v=1}^n d_v}{n}$$

$$\boxed{\tan \delta = \frac{\sum_{v=1}^n d_v}{n}}$$

3.4.

$$\underline{C_1 = C_2 = \dots = C_n = C}$$

$$\underline{d_1 = d_2 = \dots = d_n = d}$$

$$\tan \delta = \frac{\frac{d}{C} + \frac{d}{C} + \dots + \frac{d}{C}}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \dots + \frac{1}{C}} = \frac{n \frac{d}{C}}{n \frac{1}{C}} = \underline{\underline{d}}$$

Man beachte: Sind die Kapazitäten gleich, so ergibt sich der Gesamtverlustfaktor als arithmetisches Mittel der einzelnen Verlustfaktoren, unabhängig von der Schaltung. Sind Kapazitäten und Verlustfaktoren gleich, dann ist der Gesamtverlustfaktor gegenüber dem Einzelwert unverändert. Dieses Ergebnis wird auch erzielt, wenn nur die Einzelverlustfaktoren gleich sind.

Aufgabe 4

4.1.

$$u_c = u_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \tau = R_x \cdot C$$

$$\frac{u_o}{u_c} = e^{\frac{t}{\tau}}$$

$$\ln \frac{u_o}{u_c} = \frac{t}{\tau} \implies \tau = \frac{t}{\ln u_o - \ln u_c}$$

$$R_x = \frac{t}{C(\ln u_o - \ln u_c)}$$

$$= \frac{60 \text{ s} \cdot \text{V}}{50 \cdot 10^{-9} \text{ As} (\ln 280 - \ln 154)} = \frac{1,2 \cdot 10^9 \Omega}{5,635 - 5,037} = 2,01 \cdot 10^9 \Omega = \underline{\underline{2,016 \Omega}}$$

4.2.

$$\text{für } \Delta n \ll r \implies \Delta b \approx \Delta n$$

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \quad \Delta \varphi = \frac{\Delta b}{r}$$

$$= \frac{\Delta b}{r \cdot \Delta t} \quad u_c = u_o \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \implies \Delta t = \tau \cdot \ln \frac{u_o}{u_c} = R \cdot C \cdot \ln \frac{u_o}{u_c}$$

$$= \frac{\Delta n}{r \cdot R \cdot C \cdot \ln \frac{u_o}{u_c}}$$

$$= \frac{0,5 \text{ cm} \cdot \text{V}}{10 \text{ cm} \cdot 500 \Omega \cdot 0,5 \text{ As} \cdot 10^{-6} / \ln 2} = \frac{10^3}{5 \cdot \ln 2} \text{ s}^{-1} = 289 \text{ s}^{-1} = \underline{\underline{17320 \text{ min}^{-1}}}$$

$$n = \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$$

$$= \frac{17320 \cdot \text{min}^{-1}}{2 \cdot \pi} = \underline{\underline{2760 \cdot \text{min}^{-1}}}$$

Die Lade- und Entladevorgänge bei Kondensatoren verlaufen bekanntlich nach e-Funktionen. Bei Umformungen stößt man somit häufig auf den natürlichen Logarithmus. Es ist darauf zu achten, daß der natürliche Logarithmus eine Zahl, also dimensionslos ist. Man normiert zweckmäßig an geeigneter Stelle, bei 4.1. z.B. in der zweiten Zeile u_o und u_c sind mit Zahlenwerten gleicher Einheiten einzusetzen, sei es in V, mV oder kV, jedoch immer beide gleich.

Aufgabe 5

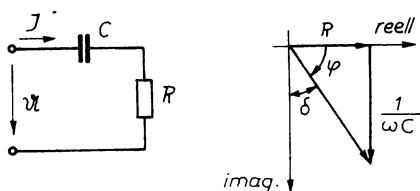


Bild 0.0.5 Zur Verlustleistung

$$\begin{aligned}
 \delta &= U \cdot J^* & J^* &= \text{zu } J \text{ konjugiert komplexer Strom} \\
 &= \frac{|U|^2}{J^*} = \frac{U^2}{R + j \frac{1}{\omega C}} & \tan \delta &= -\frac{R}{\frac{1}{\omega C}} = \omega C R \\
 &= \frac{U^2}{\frac{\omega C R + j}{\omega C}} = \frac{U^2 \cdot \omega C}{\tan \delta + j} \\
 &= \frac{U^2 \cdot \omega C (\tan \delta - j)}{\tan^2 \delta + 1} & \tan^2 \delta + 1 &= \frac{1}{\cos^2 \delta} \\
 &= \frac{U^2 \cdot \omega C (\tan \delta - j)}{\frac{1}{\cos^2 \delta}} = U^2 \cdot \omega C \cdot \tan \delta \cdot \cos^2 \delta - j U^2 \cdot \omega C \cdot \cos^2 \delta
 \end{aligned}$$

$$P = U^2 \cdot \omega C \cdot \tan \delta \cdot \cos^2 \delta \text{ Wirkleistungsanteil}$$

$$\tan \delta \cdot \cos^2 \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} \cdot \cos^2 \delta = \sin \delta \cdot \cos \delta$$

$$P_V = U^2 \cdot \omega C \cdot \sin \delta \cdot \cos \delta$$

Vergleicht man das hier gewonnene Ergebnis mit der im Abschnitt 1.0.6. gefundenen Formel, so stellt man fest, daß Abweichungen auftreten. Technische Kondensatoren haben kleine Verlustfaktoren, deren Werte bei $\tan \delta \approx 10^{-3}$ liegen. Die zu-

gehörigen Verlustwinkel sind also außerordentlich klein, sie liegen beträchtlich unter 1° . Für sehr kleine Winkel lassen sich die trigonometrischen Funktionen über einige Näherungen leicht umformen.

$$\delta \rightarrow 0 \implies \sin \delta \cdot \cos \delta \approx \sin \delta \cdot 1$$

für $\delta < 6^\circ \implies \sin \delta \approx \tan \delta$ damit wird wieder:

$$\underline{\underline{P_v = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta}}$$

Diese Formel stimmt nunmehr wieder mit der vorgenannten überein. Alle technischen Kondensatoren erfüllen die vorstehenden Bedingungen, so daß weiterhin nur mit der letzten Formel gerechnet wird.

Aufgabe 6

6.1.

$$S = U \cdot I = 220 \text{ V} \cdot 0,68 \text{ A} = \underline{\underline{149,5 \text{ VA}}} \text{ aufgenommene Scheinleistg.}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{75 \text{ W}}{150 \text{ VA}} = \underline{\underline{0,5}}$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi = 150 \text{ VA} \cdot 0,866 = \underline{\underline{130 \text{ VA}}} \text{ aufgenommene Blindleistung vor der Kompensation}$$

$$Q = P \cdot \tan \varphi' = 75 \text{ W} \cdot 0,329 = \underline{\underline{24,7 \text{ VA}}} \text{ aufgenommene Blindleistung nach der Kompensation}$$

$$Q_K = Q - Q' = \underline{\underline{105,3 \text{ VA}}} \text{ Blindleistung des Kompensationskondensators}$$

$$Q_K = U^2 \cdot \omega \cdot C$$

$$C = \frac{Q_K}{U^2 \cdot \omega} = \frac{105,3 \text{ VA}}{220^2 \text{ V}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$= \frac{105,3}{4,84 \cdot 10^4 \cdot \pi \cdot 10^2} \text{ S} = 6,93 \cdot 10^{-6} \text{ F} \approx \underline{\underline{7 \mu\text{F}}}$$

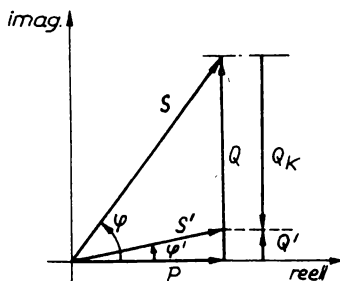
$$\left. \begin{array}{l} P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ Wirkleistung vor der Kompensation} \\ P = U \cdot I' \cdot \cos \varphi' \text{ Wirkleistung nach der Kompensation} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{beide} \\ \text{sind gleich} \end{array}$$

$$I \cdot \cos \varphi = I' \cdot \cos \varphi'$$

$$I' = I \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} = 0,68 \text{ A} \cdot \frac{0,5}{0,95} = \underline{\underline{0,385 \text{ A}}} \text{ Strom nach}$$

der Kompensation

Nach den derzeitigen Standards findet man einen Kondensator:
MP-Kompensationskondensator 7 TGL. 8699 Bl.2



**Bild 0.0.6.1 Verbesserung
des Leistungsfaktors**

6.2.

$$\ddot{u}_c = \ddot{u}_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \tau = R_E \cdot C_K$$

$$\frac{\ddot{u}_o}{\ddot{u}_c} = e^{\frac{t}{\tau}}$$

$$\ln \ddot{u}_o - \ln \ddot{u}_c = \frac{t}{R_E \cdot C_K}$$

$$R_E = \frac{t}{C_K (\ln \ddot{u}_o - \ln \ddot{u}_c)} = \frac{t}{C_K (\ln U \cdot \sqrt{2} - \ln \ddot{u}_c)}$$

$$= \frac{60 \text{ s} \cdot V}{7 \cdot 10^{-6} \text{ As} (\ln 311 - \ln 50)} = \frac{60 \cdot 10^6}{7(5,74 - 3,91)} \Omega$$

$$= 4,69 \cdot 10^6 \Omega = \underline{\underline{4,69 \text{ M}\Omega}}$$

$$P_E = \frac{U^2}{R_E} = \frac{3,11^2 \cdot V^2 \cdot A}{3,9 \cdot 10^6 V} = \underline{\underline{24,9 \text{ mW}}}$$

Um einzelne Schritte der Lösung 6.2. zu verstehen, sollen hier einige Erläuterungen folgen. Für die Berechnung von R_E liegt der ungünstigste Augenblick beim Spitzenwert der anstehenden Wechselspannung. Aus Sicherheitsgründen soll angenommen werden, daß der Kondensator auf diesen Wert aufgeladen ist. Der Widerstandswert R_E ist auf einen standardgerechten Wert abzurunden, damit die Entladung keinesfalls länger dauert. Nach der Reihe E 12 z.B. käme ein Widerstand von $3,9 \text{ M}\Omega$ in Betracht. Die Rechenwerte für die Belastung sind auf einen Nennwert aufzurunden. Die Belastungen sind im allgemeinen sehr gering, man kann kleine Bauformen der Widerstände verwenden und diese gegebenenfalls im Gehäuse des Kondensators mit unterbringen.

Literaturverzeichnis

- /1/ Handbuch elektronische Bauelemente, Ausgabe 1965,
VVB RFT Bauelemente und Vakuumtechnik Berlin.
- /2/ Prospekt "Kondensatoren", Ausgabe 1964,
VVB RFT Bauelemente und Vakuumtechnik Berlin.

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte vorbehalten

Ag 613/67/73/1200 (116)

1. Ausgabe

2. Auflage

Druck:

ZENTRALSTELLE FÜR LEHR- UND ORGANISATIONSMITTEL DES
MINISTERIUMS FÜR HOCH- UND FACHSCHULWESEN, ZWICKAU

Katalog-Nr.: 200.40-04

Vorzugsschutzgebühr: 3,00 M