Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 44 (1953)
Heft: 6

Artikel: Über das Verhalten von Kondensatoren bei Hochfrequenz
Autor: Hartmann, W.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058066

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Über das Verhalten von Kondensatoren bei Hochfrequenz

Von *W. Hartmann*, Fribourg

621.319.41 : 621.3.029.5

Ausgehend von der Ersatzschaltung des Kondensators wird die Frequenzabhängigkeit der Kapazität und des Verlustwinkels im Gebiet der Rundfunk- und Fernsehfrequenzen besprochen. Die Eigenresonanzfrequenzen von Papier-, Glimmer- und keramischen Kondensatoren werden in Kurvenblättern dargestellt und daraus Schlüsse für die Wahl der geeignetsten Kondensatoren gezogen. Für den Verlustwinkel wird eine Formel hergeleitet und diese mit gemessenen Frequenzgängen verglichen; daraus werden Rückschlüsse auf die den Verlustwinkel massgebend bestimmenden Grössen gezogen.

En partant du schéma de remplacement du condensateur, on déduit les variations de la capacité et de l'angle de pertes en fonction de la fréquence, ceci pour les fréquences utilisées pour la radiodiffusion et la télévision. Les fréquences de résonance propre des condensateurs au papier, au mica et en céramique sont représentées par des courbes. De ces dernières, on en tire le domaine d'application de ces condensateurs. La comparaison des résultats donnés par une formule d'une part et par des mesures d'autre part nous donne les principaux facteurs qui déterminent l'angle de pertes.

1. Einleitung

Fast alle wichtigen Grössen von Kondensatoren, z. B. die wirksame Kapazität und der Verlustwinkel, hängen von der Frequenz ab. Diese Abhängigkeit wird bei der Wahl eines Kondensators zweckmässig berücksichtigt, da bei einer geeigneten Wahl sehr oft Störungen vermieden oder eine bessere Wirkung erzielt werden kann. So spielt z. B. die Frequenzabhängigkeit der Kapazität eine Rolle bei Kopplungs- oder Entkopplungskondensatoren, mit welchen man im allgemeinen in einem bestimmten Frequenzband eine möglichst kleine Impedanz zu erzielen trachtet. Das Wachsen des Verlustwinkels mit zunehmender Frequenz kann in anderen Fällen die Verwendung eines bestimmten Kondensators in Schwingkreisen mit einem hohen Gütefaktor ausschliessen. In der vorliegenden Arbeit wird über die Abhängigkeiten der Kapazität und des Verlustwinkels der gebräuchlichsten Kondensatoren von der Frequenz im Gebiet der Rundfunk- und Fernsehfrequenzen berichtet.

2. Ersatzschaltung des Kondensators

Die gewöhnlichen Glimmer-, Papier- und keramischen Kondensatoren können im betrachteten Frequenzgebiet durch die Ersatzschaltung in Fig. 1 dargestellt werden.

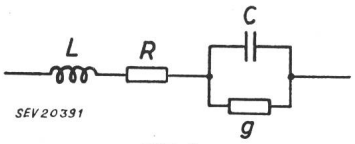

Fig. 1
Ersatzschaltung des Kondensators
L Eigeninduktivität; R Widerstand der Zuleitungen und Beläge; C ideale Kapazität; g Leitwert der dielektrischen Verluste und des Isolationswiderstandes

Aus dieser folgt für die Impedanz:

$$Z = R + \frac{g}{g^2 + \omega^2 C^2} - \mathrm{j}\left[\frac{\omega C}{g^2 + \omega^2 C^2} - \omega L\right]$$

wo

- C ideale Kapazität,
- g Leitwert der dielektrischen Verluste und des Isolationswiderstandes,
- R Widerstand der Zuleitungen und Beläge,
- L Induktivität der Zuleitungen und Beläge

Allgemein ist $g \ll \omega C$; mit dieser Vereinfachung findet man für die Impedanz:

$$Z = R + \frac{g}{\omega^2 C^2} - \mathrm{j}\left[\frac{1}{\omega C} - \omega L\right] \qquad (1)$$

Gl. (1) zeigt, dass der Kondensator als einfache Serieschaltung eines wirksamen Widerstandes R_w und einer wirksamen Kapazität C_w dargestellt werden kann (Fig. 2). Diese Grössen werden mit der

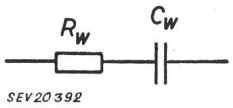

Fig. 2
Darstellung des Kondensators als Serieschaltung eines Widerstandes R_w und einer Kapazität C_w

Messbrücke oder dem Q-Messer gemessen; für sie gelten die Beziehungen:

$$R_w = R + \frac{g}{\omega^2 C^2} \qquad (2)$$

$$C_w = \frac{C}{1 - \omega^2 L C} \qquad (3)$$

3. Diskussion der Ersatzschaltung

3.1. Die Abhängigkeit der wirksamen Kapazität von der Frequenz

Wie aus der Ersatzschaltung in Fig. 1 hervorgeht, bildet die ideale Kapazität C mit der Induktivität L der Zuleitungen und Beläge einen durch die Widerstände R und $1/g$ gedämpften Serieschwingkreis. Es existiert somit eine Resonanzfrequenz des Kondensators, welche durch die Elemente L und C gegeben ist:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L C} \qquad (4)$$

Führt man diese Beziehung in die Gl. (3) ein, so folgt für die Frequenzabhängigkeit der wirksamen Kapazität:

$$C_w = \frac{C}{1 - \frac{f^2}{f_0^2}} \qquad (5)$$

Je mehr man sich mit der Betriebsfrequenz f der Resonanzfrequenz f_0 nähert, desto mehr erscheint die wirksame Kapazität C_w gegenüber der idealen — bei Niederfrequenz gemessenen — Kapazität C vergrössert. Bei der Resonanzfrequenz stellt der Kondensator einen reinen Wirkwiderstand von der Grösse R_w dar; oberhalb der Resonanzfrequenz ist die Impedanz induktiv.

In Fig. 3 ist die Impedanz von drei zylindrischen Papierkondensatoren in sog. induktionsfreier Ausführung in Funktion der Frequenz dargestellt. Aus diesen Impedanzkurven lassen sich folgende Werte für die Elemente der Ersatzschaltung ermitteln:

Kapazität	Resonanzfrequenz MHz	Induktivität µH	Resonanzwiderstand Ω	Dämpfung	Gütefaktor
0,1 µF	3	0,0275	0,03	0,0576	17,4
0,01 µF	10	0,025	0,1	0,0628	15,9
1000 pF	31	0,025	0,4	0,0808	12,4

Aus dem Verlauf der Impedanzkurven ist ersichtlich, dass man vorteilhaft denjenigen Kopplungskondensator wählt, dessen Resonanzfrequenz möglichst nahe bei der Arbeitsfrequenz liegt. Man erzielt dann eine Impedanz, welche erheblich unter dem Wert $1/\omega C$ liegen kann. Man sieht ferner, dass durch die Resonanz ein Kondensator mit einer grösseren Kapazität in einem bestimmten Frequenzgebiet eine grössere Impedanz haben kann, als ein kleiner Kondensator. So ist z. B. die Impedanz des Kondensators mit 0,01 µF im Frequenzgebiet oberhalb 7 MHz kleiner, als die des Kondensators mit einer Kapazität von 0,1 µF. Die Bandbreite ist allerdings wegen der geringen Dämpfung relativ klein. Immerhin beträgt die relative Breite des Frequenzbandes, in welchem die Impedanz wesentlich unter dem Wert $1/\omega C$ liegt, etwa 60 %.

Durch die Kombination einer Drosselspule in Parallelresonanz mit ihrer Eigenkapazität und eines Kondensators in Serieresonanz mit seiner Eigeninduktivität lassen sich sehr wirksame Filter aufbauen.

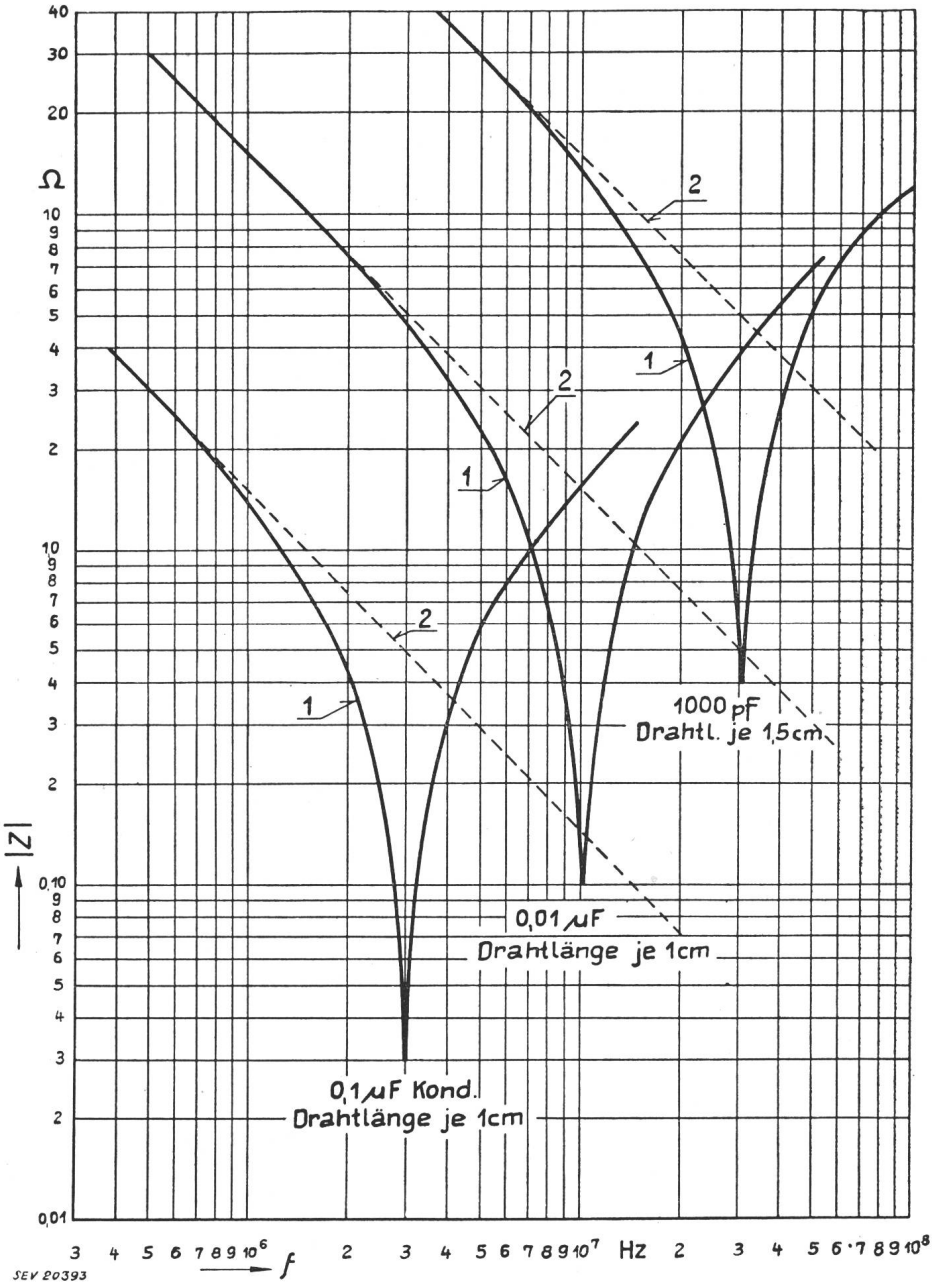

Fig. 3
Betrag der Impedanz Z des Kondensators als Funktion der Frequenz

1 Verlauf des Betrages der Impedanz $|Z|$ des Kondensators mit Selbstinduktion
2 Verlauf der Impedanz $1/\omega C$ der idealen Kapazität ohne Selbstinduktion

Die Resonanzfrequenz der Kondensatoren wird neben der Kapazität von der Induktivität bestimmt. Diese ist die Summe der Induktivitäten der Zuleitungen und Beläge. Die Induktivität der Beläge hängt vom Aufbau und von der Gestalt des Kondensators ab. Für die zylindrischen Papier- und Keramikkondensatoren ist sie ungefähr gleich der Induktivität eines Rohres mit den äusseren Abmessungen des Kondensators:

$$L_B = 2\,l \cdot 10^{-3} \left(\ln \frac{4\,l}{d} - 1\right) \quad \mu\text{H} \qquad (6)$$

L_B Induktivität der Beläge,
l Länge des Kondensators in cm,
d Durchmesser des Kondensators in cm

Damit diese Induktivität klein wird, sollte ein Wickel- oder Rohrkondensator möglichst kurz und dick sein. Die «induktionsfreien» Papierkondensatoren werden mit beidseitig vorstehenden Metallfolien gewickelt und diese auf jeder Stirnseite nach dem Wickeln verlötet. Besonders kleine Induktivitäten weisen die keramischen Scheibenkondensatoren auf.

Für die Induktivität der Anschlussdrähte gilt ebenfalls Gl. (6). Setzt man in diese Formel für den Wickel und die Drähte gebräuchliche Dimensionen ein, so sieht man, dass die Induktivitäten des Wik-

kels und der Anschlussdrähte für Drahtlängen von 1 cm pro Seite ungefähr gleich gross sind. Sind die Anschlussdrähte länger, so bildet deren Induktivität den Hauptanteil der Eigeninduktivität des Kondensators. Dies geht ebenfalls aus den Fig. 4...6 hervor, in denen die Resonanzfrequenzen von «induktionsfreien» Papierkondensatoren und von Glimmer- und keramischen Kondensatoren dargestellt sind.

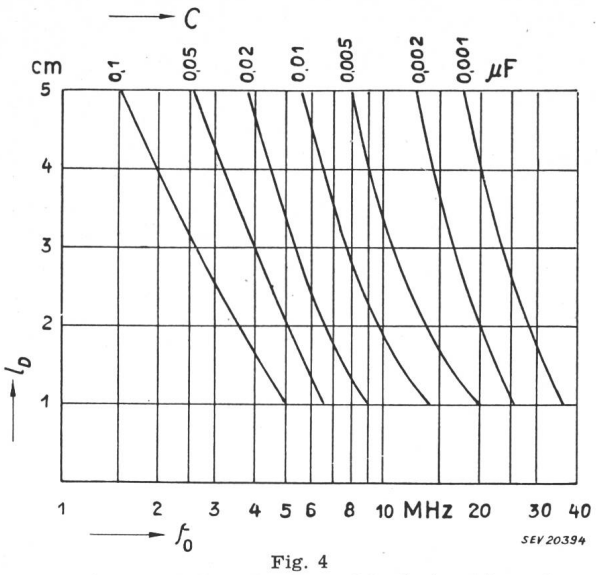

Fig. 4
Zusammenhang zwischen der Kapazität C, der Länge der Anschlussdrähte pro Seite l_D und der Resonanzfrequenz f_0 von sog. selbstinduktionsfreien, zylindrischen Papierkondensatoren für eine Betriebsspannung von 400 V_

In den bisherigen Betrachtungen wurde angenommen, die Kapazität C sei unabhängig von der Frequenz. Dies stimmt für Papierkondensatoren nicht, denn bei diesen Kondensatoren ändert sich die Kapazität C mit der Frequenz. Diese Kapazitätsänderung hängt vom Imprägniermittel ab; sie kann z. B. für eine Zunahme der Frequenz um eine Zehnerpotenz etwa —1 % betragen. Auch bei Glimmerkondensatoren wird im Frequenzgebiet zwischen 100 Hz und 1 MHz oft eine Kapazitätsabnahme von ungefähr 0,5 ‰ pro Frequenzdekade beobachtet.

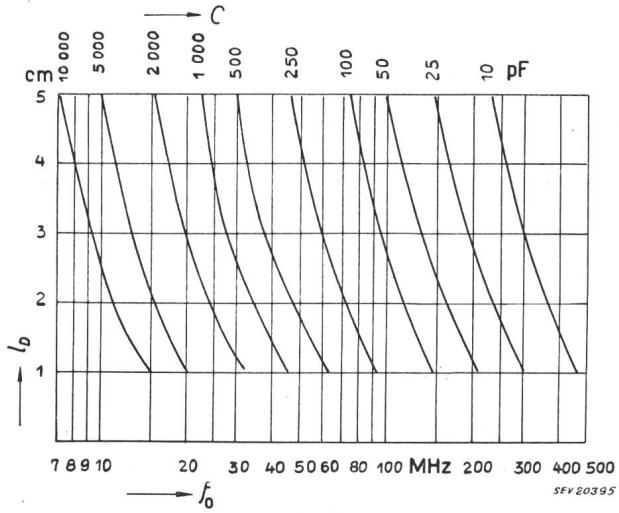

Fig. 5
Zusammenhang zwischen der Kapazität C, der Länge der Anschlussdrähte pro Seite l_D und der Resonanzfrequenz f_0 von Glimmerkondensatoren für eine Betriebsspannung von 500 V_

In allen Fällen, wo ein genauer Wert der effektiven Kapazität gefordert wird, wie etwa in Filtern und Schwingkreisen, wirkt die Resonanzerscheinung störend. Man wird für diese Anwendungen Kondensatoren wählen, deren Resonanzfrequenz

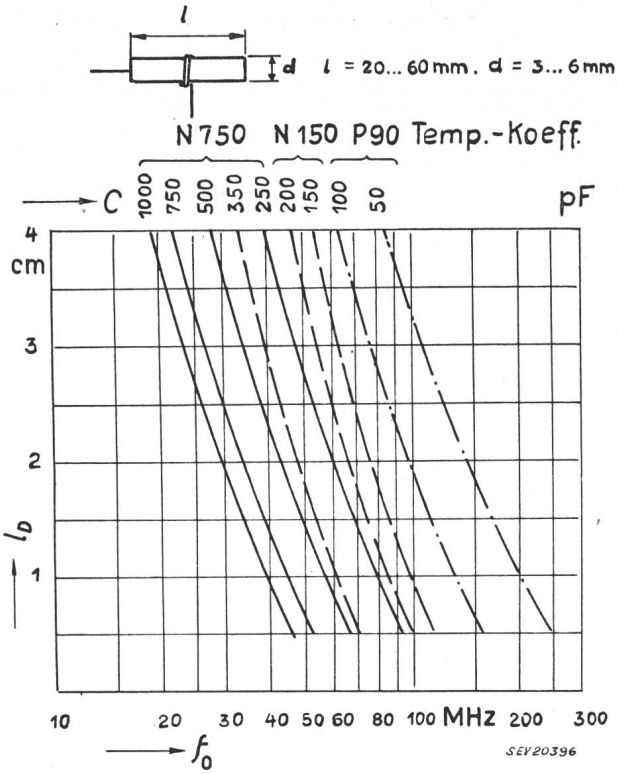

Fig. 6
Zusammenhang zwischen der Kapazität C, der Länge der Anschlussdrähte pro Seite l_D und der Resonanzfrequenz f_0 von keramischen Rohrkondensatoren für eine Betriebsspannung von 500 V_
Temperaturkoeffizient $-750 \cdot 10^{-6}$, $-150 \cdot 10^{-6}$ und $+90 \cdot 10^{-6}$

möglichst viel höher liegt, als die Arbeitsfrequenz. Grundsätzlich sollte in solchen Fällen die Kapazität der Kondensatoren bei der Arbeitsfrequenz gemessen werden.

3.2. Die Abhängigkeit des Verlustwinkels von der Frequenz

Der Tangens des Verlustwinkels δ ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q} = R_w \, \omega \, C_w \tag{7}$$

Setzt man für R_w und C_w die Grössen aus den Gl. (2) und (3) ein, so folgt für $\operatorname{tg} \delta$:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{1 - \omega^2 L C} \left[R \, \omega \, C + \frac{g}{\omega \, C} \right] \tag{8}$$

Beschränkt man sich auf das Frequenzband unterhalb der Resonanzfrequenz, wo $\operatorname{tg} \delta$ noch nicht entartet ist, so gilt:

$$\operatorname{tg} \delta \approx R \, \omega \, C + \frac{g}{\omega \, C} \tag{9}$$

Der Widerstand R der Anschlussdrähte und Beläge nimmt wegen der Stromverdrängung mit steigender Frequenz zu. Für die Frequenzabhängigkeit

von R gilt bei höheren Frequenzen näherungsweise folgender Ansatz:

$$R(\omega) \approx R_0 \, k \, \omega^{\frac{1}{2}} \qquad (10)$$

R_0 Gleichstromwiderstand der Zuleitung und Beläge
k Konstante.

Der Leitwert g setzt sich aus dem mit Gleichstrom gemessenen Leitwert des Isolationswiderstandes und dem Leitwert der dielektrischen Verluste zusammen:

$$g = g_0 + g_D \qquad (11)$$

g_0 Leitwert der Isolation bei Gleichstrom
g_D Leitwert der dielektrischen Verluste

Für die Frequenzabhängigkeit des Leitwertes der dielektrischen Verluste gilt bei vielen Dielektra ein Exponentialgesetz:

$$g_D(\omega) = g_D \, \omega^n \qquad (12)$$

Wenn wir nun die Gl. (10) bis (12) in die Gl. (9) einsetzen, kann man tg δ wie folgt als Funktion der Frequenz darstellen:

$$\operatorname{tg} \delta(\omega) \approx k \, R_0 \, C \, \omega^{\frac{3}{2}} + \frac{g_0}{C} \, \omega^{-1} + \frac{g_D}{C} \, \omega^{n-1} \qquad (13)$$

Der Tangens des Verlustwinkels δ wird demnach aus 3 Gliedern gebildet:

Das erste Glied enthält die Wirkung der Widerstände der Zuleitungen und Beläge. Dieser Anteil von tg δ nimmt mit steigender Frequenz etwas stärker als linear zu, und er ist im allgemeinen erst bei hohen Frequenzen bedeutend.

Das zweite Glied enthält die Wirkung des Isolationswiderstandes; dessen Leitwert g_0 ist normalerweise so klein, dass dieses Glied vernachlässigt werden darf.

Der Anteil der dielektrischen Verluste an tg δ — das dritte Glied — ist naturgemäss für jedes als Dielektrikum verwendete Material verschieden. Er hängt ferner stark von äusseren Einflüssen, wie von der Temperatur und von der Feuchtigkeit ab. Allgemein gilt die Regel, dass der Leitwert der dielektrischen Verluste g_D mit sinkendem Feuchtigkeitsgehalt des Dielektrikums kleiner wird. Man versucht deshalb fast bei allen Kondensatortypen den Einfluss der Feuchtigkeit durch eine Trocknung und Imprägnierung im Vakuum auszuschalten.

Im Folgenden sollen nun die den Frequenzgang von tg δ bestimmenden Grössen für Papier-, Glimmer- und Keramikkondensatoren eingehend besprochen werden.

3.21. *Papierkondensatoren*

Bei den Papierkondensatoren wird der Verlustwinkel hauptsächlich durch die dielektrischen Verluste bestimmt. Der Exponent $(n-1)$ ist positiv, d. h., der Verlustwinkel steigt mit zunehmender Frequenz. In Fig. 7 ist der Frequenzgang von tg δ für verschiedene selbstinduktionsfreie und mit Wachs imprägnierte Papierkondensatoren dargestellt. Man kann aus den Kurven folgende Werte berechnen:

$$n \approx 1{,}374 \text{ und } g_D/C \approx 1{,}3 \cdot 10^{-4}$$

Für den Tangens des Verlustwinkels gilt in diesem Fall:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{g_D}{C} \, \omega^{n-1} \approx 2{,}6 \cdot 10^{-4} f^{0{,}374} \qquad (14)$$

Papierkondensatoren besitzen somit bei Hochfrequenz grundsätzlich einen grossen Verlustwinkel. Sie können deshalb in Schwingkreisen mit einem

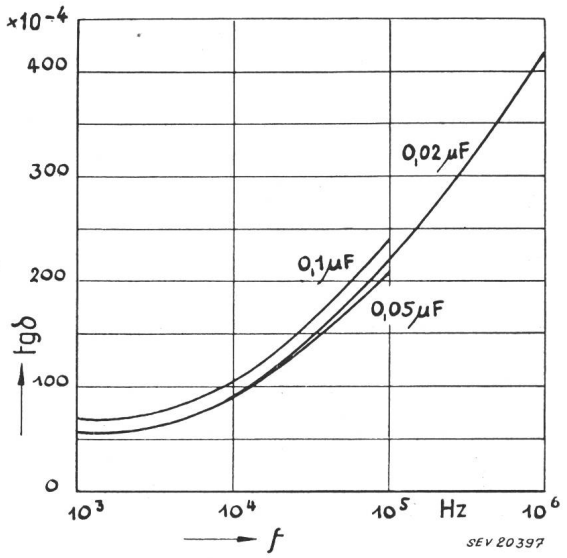

Fig. 7
Der Tangens des Verlustwinkels δ von mit Wachs imprägnierten zylindrischen Papierkondensatoren in Funktion der Frequenz f

hohen Gütefaktor nicht verwendet werden. Auch beim Einsatz als Kopplungs- oder Entkopplungskondensatoren sollten sie möglichst so geschaltet werden, dass sie nicht einen Zweig in einem Kreis bilden, welcher einen hohen Gütefaktor aufweisen soll. In der Fig. 8 ist dies am Beispiel eines HF-Verstärkers dargestellt.

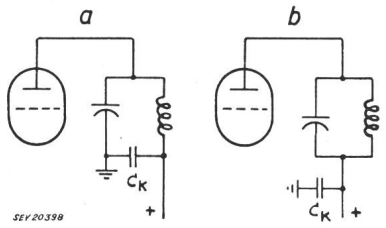

Fig. 8
Schaltung eines Entkopplungskondensators C_K im Schwingkreis eines Verstärkers
a falsch: C_K im Schwingkreis; *b* richtig: C_K nicht im Schwingkreis

3.22. *Glimmerkondensatoren*

Die dielektrischen Verluste von trockenem, reinem Glimmer sind sehr klein und von der Frequenz praktisch unabhängig; der Verlustwinkel beträgt ca. $2 \cdot 10^{-4}$. In den Kondensatoren entstehen durch die Versilberung des Glimmers, durch Isoliermaterialien und Feuchtigkeit zusätzliche dielektrische Verluste; diese sind besonders bei tiefen Frequenzen bedeutend grösser, als die Verluste des Glimmers allein. Der Verlustwinkel imprägnierter Kondensatoren beträgt bei 1000 Hz etwa $(4...20) \cdot 10^{-4}$. Der

Verlustwinkel nimmt mit steigender Frequenz ab, woraus folgt, dass der Exponent $(n - 1)$ negativ ist. Bei hohen Frequenzen wird der Anteil der Verluste in den Widerständen bedeutend und bewirkt wieder eine Zunahme des Verlustwinkels mit steigender Frequenz. Man kann deshalb beim Frequenzgang des Verlustwinkels folgende 3 Gebiete unterscheiden:

1. Im Frequenzgebiet unterhalb 10...100 kHz überwiegt der Anteil der dielektrischen Verluste, und für tg δ gilt mit guter Näherung die Formel:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{g_D}{C} \omega^{n-1} \tag{15}$$

Man findet aus Messungen etwa folgende Werte:

$$n - 1 \approx -0{,}2 \ldots -0{,}25 \text{ und } \frac{g_D}{C} \approx (35 \ldots 180) \cdot 10^{-4}$$

Damit gilt für tg δ in diesem Gebiet:

$$\operatorname{tg} \delta \approx (35 \ldots 180) \cdot 10^{-4} \cdot \omega^{-0{,}25} \approx \frac{(22 \ldots 110)\, 10^{-4}}{\sqrt[4]{f}} \tag{16}$$

2. Im Frequenzgebiet von 100 kHz bis 1 MHz sind die durch die dielektrischen und die Stromwärmeverluste bewirkten Anteile von tg δ etwa gleich gross; der Verlustwinkel durchläuft ein Minimum.

3. Von 1...10 MHz an bestimmen die Stromwärmeverluste in den Widerständen den Verlustwinkel praktisch allein. In diesem Frequenzgebiet ist

$$\operatorname{tg} \delta \approx k\, R_0\, C\, \omega^{\frac{3}{2}} \tag{17}$$

Diese Formel zeigt, dass tg δ mit steigender Frequenz stark zunimmt. Falls der Widerstand R_0 und die Konstante k für einen bestimmten Kondensatortyp und eine gegebene Drahtlänge nicht wesentlich von der Kapazität C abhängen, erreicht der Verlustwinkel bei einer um so tieferen Frequenz einen bestimmten Wert, je grösser die Kapazität ist. Die Messungen bestätigen diese Annahme, und das Verhältnis der Frequenzen, bei welchen 2 Kondensatoren der gleichen Bauart und mit verschiedener Kapazität den gleichen Verlustwinkel aufweisen, entspricht im betrachteten Gebiet der hohen Frequenzen ungefähr der Beziehung:

$$\frac{f_1}{f_2} \approx \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{18}$$

Diese Verhältnisse treten in den in Fig. 9 dargestellten Messungen an zwei in Kunstharz eingepressten Glimmerkondensatoren deutlich in Erscheinung.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, dass auch Glimmerkondensatoren bei hohen Frequenzen relativ grosse Verlustwinkel aufweisen. Man muss sich somit in allen Fällen, wo ein hoher Gütefaktor gefordert wird, durch eine Messung bei der Betriebsfrequenz vom Gütewert des Kondensators überzeugen. In den meisten gebräuchlichen Verstärkerschaltungen bedingt allerdings die vorgeschriebene Bandbreite eine so hohe Kreisdämpfung, dass die Kondensatoren noch genügend gut sind.

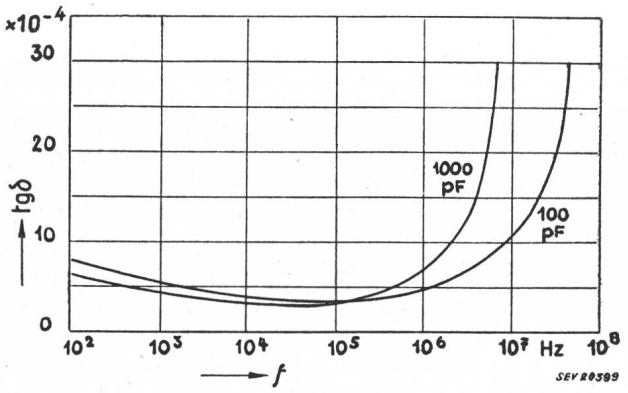

Fig. 9
Änderung des Tangens des Verlustwinkels δ von Glimmerkondensatoren in Funktion der Frequenz f

3.23. *Keramikkondensatoren*

Das Verhalten der Keramikkondensatoren entspricht weitgehend demjenigen der Glimmerkondensatoren. Bei tiefen Frequenzen überwiegen ebenfalls die dielektrischen und bei hohen die Stromwärmeverluste in den Drähten und Belage. Aus Fig. 10 ist

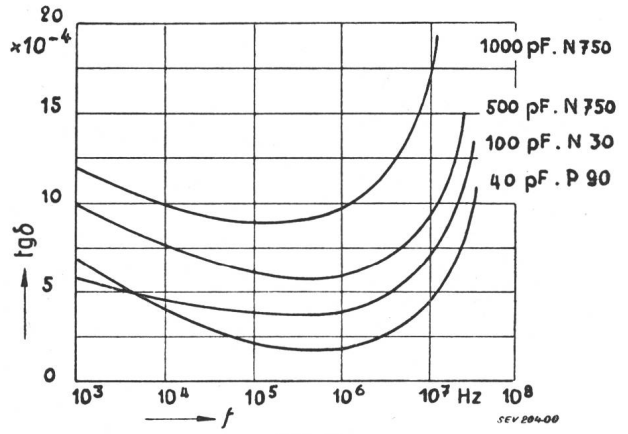

Fig. 10
Änderung des Tangens des Verlustwinkels δ von keramischen Rohrkondensatoren
Temperaturkoeffizienten $-750 \cdot 10^{-6}$, $-30 \cdot 10^{-6}$ und $+90 \cdot 10^{-6}$

ersichtlich, dass das Minimum des Verlustwinkels ebenfalls etwa zwischen 100 kHz und 1 MHz liegt. Oberhalb 10 MHz steigen die Verluste stark mit zunehmender Frequenz.

Schlussbetrachtungen

Zu den hier beschriebenen Einflüssen der Frequenz auf die wirksame Kapazität und den Verlustwinkel gesellen sich noch die Einflüsse der Temperatur und der Feuchtigkeit. Die Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur wird im allgemeinen vom Fabrikant für jeden Kondensatortyp angegeben. Eine Zunahme der Temperatur bewirkt fast in allen Fällen eine Vergrösserung des Verlustwinkels. Die Feuchtigkeit wirkt sich ganz besonders durch eine Verkleinerung des Isolationswiderstandes und durch eine Vergrösserung des Verlustwinkels aus.

Alle hier mitgeteilten Messungen wurden mit Kondensatoren der Kondensatoren Freiburg A.-G. ausgeführt.

Adresse des Autors:
Walter Hartmann, dipl. Techniker, Av. de Pérolles 65a, Fribourg.