

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 48 (1957)
Heft: 6

Artikel: Eigenschaften von Kondensatoren für grosse Hochfrequenzleistungen
Autor: Römer, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060595>

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: 03.04.2026

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

Eigenschaften von Kondensatoren für grosse Hochfrequenzleistungen

Von R. Römer, Fribourg

621.319.4.029.6

Zum Bau von Hochfrequenzkondensatoren eignen sich nur ganz bestimmte Dielektrika, aus denen, je nach den gegebenen Verhältnissen von Spannung, Frequenz, Temperatur und Raum, ganz verschiedenartige Kondensatortypen hergestellt werden. Die Zusammensetzung der Verluste im Kondensator und deren Messungen durch verschiedene Methoden, besonders bei hohen Spannungen und Frequenzen, werden angegeben. Näher wird eingegangen auf die Eigenschaften von Pressgas-, Vakuum-, Keramik-, Glimmer- und Polystyrolkondensatoren und deren Anwendungen.

Dans la fabrication des condensateurs à haute fréquence, on ne peut utiliser que certains diélectriques bien déterminés, dont on crée des types de condensateurs très différents selon les conditions de tension, de fréquence, de température et selon la place disponible. L'auteur indique de quoi se composent les pertes dans les condensateurs et quelles méthodes on emploie pour les mesurer, surtout à haute tension et à haute fréquence. Il étudie spécialement les caractéristiques et les applications des condensateurs à gaz comprimé, à vide, à céramique, au mica et au polystyrène.

I. Einleitung

Kondensatoren für grosse Hochfrequenzleistungen werden hauptsächlich in Grossendern und Industriegeneratoren verwendet; sie haben hohen Anforderungen zu genügen. Speziell beansprucht werden sie durch strenge Betriebsbedingungen, sei es eine hohe HF-Spannung, einen grossen HF-Strom oder eine hohe Gleichspannung mit überlagerter HF-Spannung, welche alle zu beträchtlichen Feldstärken im Kondensator führen können. Es muss deshalb beim Entwurf solcher Kondensatoreinheiten allen elektrischen Erscheinungen, physikalischen Effekten und speziell dem Ableiten der im Kondensator erzeugten Verlustwärme Rechnung getragen werden. Die Kühlung geschieht in der Regel mit Luft oder Wasser, wobei die Luftkühlung auf natürlichem Wege oder forciert durchgeführt werden kann.

Fehlerhafte Konstruktion oder falsche Anwendung können die Lebensdauer eines Kondensators entschieden kürzen: an Orten zu grosser Feldstärke tritt Ionisation auf; schlechte Stromverteilung führt zu örtlicher Erhitzung oder es ergeben sich Resonanzerscheinungen. Diese Hinweise zeigen deutlich, dass es nicht ganz einfach ist, die Eigenschaften von Hochfrequenzkondensatoren grosser Leistung zu beurteilen. Spannungsprüfungen mit Gleich- oder 50-Hz-Wechselspannung sowie Messungen mit der Scheringbrücke erlauben nur eine teilweise Beurteilung des zukünftigen Verhaltens im Betrieb.

Betrachtet man einige im Handel erhältliche Dielektrika mit kleinen Verlusten bis zu einer Frequenz von 10^8 Hz und einer Betriebstemperatur bis zu 100°C , so kommen nur Keramik, Glimmer und Teflon, sowie selbstverständlich Vakuum und Gase (z. B. Stickstoff oder Schwefelhexafluor) in Frage. Für Betriebstemperaturen bis zu 70°C kann noch das Polystyrol hinzugezählt werden. Für HF-Kondensatoren eignet sich also nur eine beschränkte Zahl von Dielektrika.

Fig. 1 und 2 zeigen ein Beispiel der Verwendung von Hochfrequenzkondensatoren grosser Leistung. Es handelt sich dabei um die Endstufe eines 200-kW-Mittelwellensenders [1]). Fig. 1 zeigt die Schwingkreiskondensatoren C_1 , ausgebildet als veränderliche Pressgaskondensatoren mit den parallel dazu geschalteten Glimmerkondensatoren in Ölbad C_2 . Die Kopplungskondensatoren C_3 sind ebenfalls

als Glimmerkondensatoren in Öl ausgeführt, mit Keramiktopfen als Gehäuse. Bei C_4 von Fig. 2 handelt es sich wieder um Glimmerkondensatoren in Keramiktopfen (ölgefüllt), C_5 ist eine Batterie von Keramiktopfkondensatoren eingeschaltet im Gitterkreis der Endröhren, C_6 stellen Luftglimmerkondensatoren zur Entkopplung der Endröhrenkathoden dar. Alle Kondensatoren dieses Senders sind mit einem der drei Dielektrika Keramik, Glimmer oder

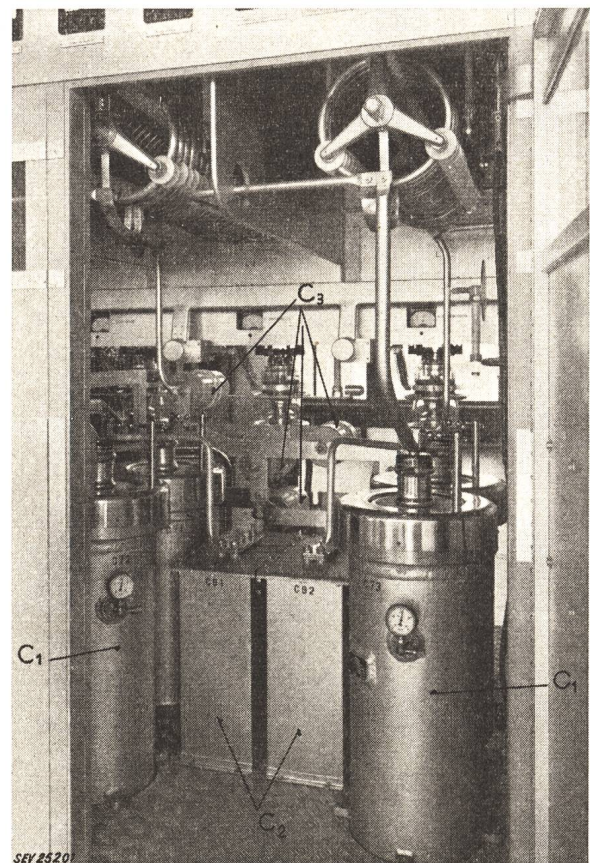


Fig. 1

Frontseite der HF-Stufe eines 200-kW-Senders mit Schwingkreisinduktivitäten und den verschiedenen Kondensatoren

C_1 veränderlicher Pressgaskondensator 300–3000 pF

C_2 ölgekühlter Glimmerkondensator

C_3 Glimmerkondensator in Keramiktopf

Stickstoff aufgebaut, weisen jedoch eine ganz auf ihren Verwendungszweck ausgerichtete Konstruktion auf. Ein vereinfachtes Ersatzschema dieser Endstufe ist in Fig. 3 dargestellt.

1) siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Artikels.

II. Verhalten der Kondensatoren in Funktion der Frequenz

1. Ersatzschema und Eigenresonanz

Das Ersatzschema eines Kondensators ist in Fig. 4 dargestellt. L und R entsprechen der Induktivität bzw. dem Widerstand der Zuleitungen und der Beläge, C ist die ideale Kapazität und G der Leitwert des Dielektrikums. Messungen der Verluste reiner Dielektrika in Funktion der Frequenz zeigten, dass

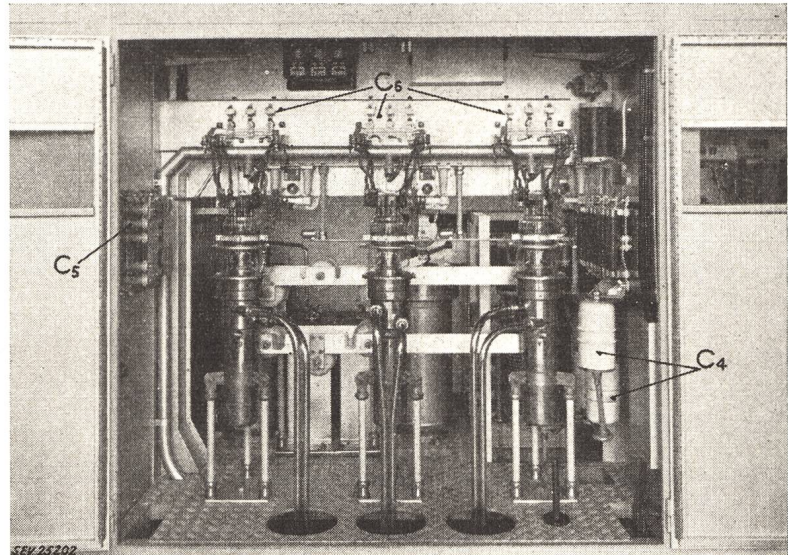


Fig. 2

Endstufe eines 200-kW-Senders mit Röhren und Kondensatoren

- C_4 Glimmerkondensator in Keramiktopf
- C_5 Keramiktopfkondensator
- C_6 Luftglimmerkondensator

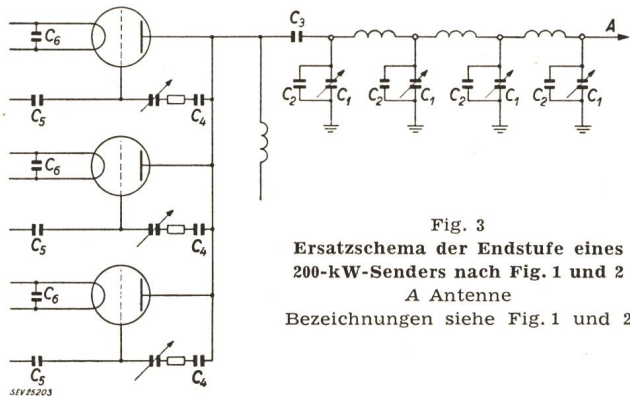


Fig. 3

Ersatzschema der Endstufe eines 200-kW-Senders nach Fig. 1 und 2
A Antenne
Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2

nur eine beschränkte Zahl von Materialien für HF-Anwendungen in Frage kommt (siehe Tabelle I).

Angaben verschiedener Dielektrika von Kondensatoren bei HF-Belastung

Tabelle I

Dielektrikum	Chemische Zusammensetzung des Dielektrikums	Dielektrizitätskonstante ϵ bei 10^8 Hz	Verlustfaktor $\text{tg } \delta \times 10^{-4}$ bei 10^8 Hz	Ungef. Erweichungspunkt $^\circ\text{C}$
Keramik P 130	Magnesiumsilikat	6,1	3	1450
Keramik N 750	Titandioxyd	99	7	1500
Polyäthylen		2,26	2	60
Polystyrol		2,55	1	100
Teflon	Polytetrafluoräthylen	2,1	2	280
Glimmer		5,4	2	1500
Quarz	100% SiO_2	3,78	2	1600
Vakuum			0	—
Stickstoff	N_2	1,0002	< 1	—
Schwefelhexafluorid	SF_6	2,3	< 1	—

Aus Fig. 4 lässt sich die Impedanz Z der Ersatzschaltung wie folgt berechnen:

$$Z = R + \frac{G}{G^2 + \omega^2 C^2} - j \frac{\omega C}{G^2 + \omega^2 C^2} + j \omega L \quad (1)$$

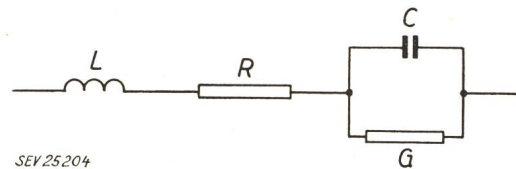
Praktisch und speziell bei Hochfrequenz ist $G^2 \ll \omega^2 C^2$, woraus folgt:

$$Z = R + \frac{G}{\omega^2 C^2} - j \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L \right) \quad (2)$$

Dies erlaubt, die Impedanz in zwei Teile, den Widerstand R_e und die effektive Kapazität C_e zu zerlegen:

$$R_e = R + \frac{G}{\omega^2 C^2} \quad (3)$$

$$C_e = \frac{C}{1 - \omega^2 L C} \quad (4)$$



SEV 25204

Fig. 4

Ersatzschema eines Kondensators

- L Induktivität; R Seriewiderstand; G Leitwert;
- C ideale Kapazität

Wird die Frequenz bis zur Resonanzfrequenz ω_0 gesteigert, so gilt für den Serieschwingkreis:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L$$

In diesem Fall geht die Impedanz gegen ein Minimum und wird rein Ohmisch.

Je näher man der Resonanzfrequenz kommt, um so mehr nimmt die effektive Kapazität C_e zu und geht gegen unendlich; oberhalb der Resonanzfrequenz ist die Impedanz induktiv. In Fig. 5 ist für einen Glimmerkondensator von 30 kVar, 500 pF, das Verhalten der Impedanz in Funktion der Frequenz dargestellt. Die Resonanzfrequenz dieser Konstruktion liegt bei 30 MHz [2].

Aus diesen Überlegungen geht hervor, dass ein Kondensator unterhalb seiner Resonanzfrequenz arbeiten muss, vor allem wenn er als Schwingkreis-kondensator eingesetzt wird. Erfolgt ein Überschreiten der Eigenresonanz, so nehmen Spannung und Strom so grosse Werte an, dass eine thermische Zerstörung des Kondensators eintreten kann.

2. Verluste der Kondensatoren

Die Abhängigkeit des Verlustwinkels $\text{tg} \delta$ einer Serieschaltung von C_e und R_e in Funktion der Frequenz ist gegeben durch:

$$\text{tg} \delta = R_e \omega C_e \quad (5)$$

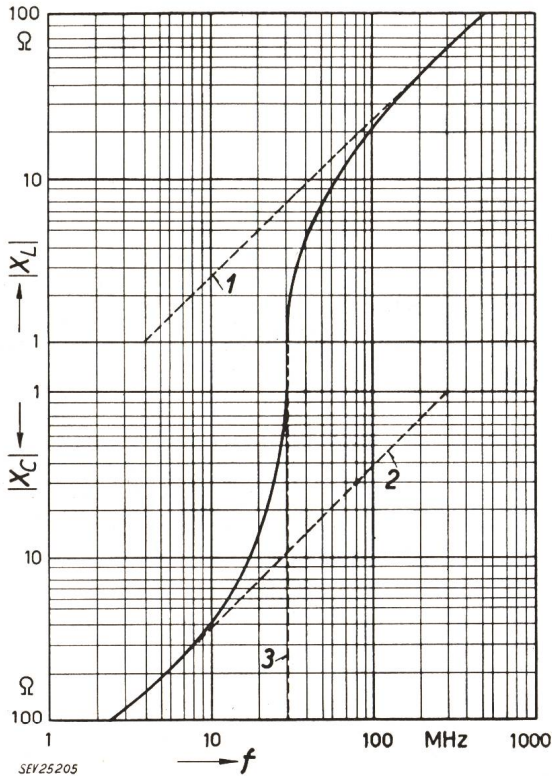


Fig. 5

Verhalten eines Glimmerkondensators in der Umgebung der Resonanzfrequenz

1 idealer Verlauf ωL ; 2 idealer Verlauf $1/\omega C$; 3 Resonanzfrequenz; X_C kapazitive Reaktanz; X_L induktive Reaktanz; $C = 500 \text{ pF}$; $L = 0,04 \text{ } \mu\text{H}$; $f_0 = 30 \text{ MHz}$

Durch Ersatz der Grössen R_e und C_e durch die in den Gl. (3) und (4) gefundenen Ausdrücke ergibt sich:

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \left(R \omega C + \frac{G}{\omega C} \right) \quad (6)$$

Unterhalb der Resonanzfrequenz kann $\omega^2 LC$ gegen 1 vernachlässigt werden, woraus mit guter Annäherung folgt:

$$\text{tg} \delta \approx R \omega C + \frac{G}{\omega C} \quad (7)$$

Der Verlustwinkel setzt sich aus dem Widerstand der Anschlussdrähte und Beläge, sowie den dielektrischen Verlusten zusammen. Der Wert von R ist bei hohen Frequenzen frequenzabhängig (Skin-Effekt) und kann folgendermassen ausgedrückt werden:

$$R(\omega) = k R_0 \omega^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Darin bedeuten R_0 den Gleichstromwiderstand und k eine Materialkonstante die vom verwendeten Material abhängt.

Unter Vernachlässigung des Isolationswiderstandes ergibt sich nach MacLeod [3] für den Leitwert der dielektrischen Verluste von Glimmer folgendes Gesetz:

$$G(\omega) = G_0 \omega^n \quad (9)$$

worin n für ein bestimmtes Dielektrikum konstant ist.

Setzt man die Gl. (8) und (9) in Gl. (7) ein, so ergibt sich für den Verlustwinkel folgende allgemeine Formel:

$$\text{tg} \delta \approx k R_0 C \omega^{\frac{3}{2}} + \frac{G_0}{C} \omega^{n-1} \quad (10)$$

Die Güte Q wird folglich

$$Q = \frac{1}{\text{tg} \delta} \approx \frac{1}{k R_0 C} \omega^{-\frac{3}{2}} + \frac{C}{G_0} \omega^{1-n} \quad (11)$$

Die dielektrischen Verluste hängen stark von der Eigenart des Dielektrikums ab; für wachsimprägnierte Papierkondensatoren mit $n > 1$, die als HF-Kondensatoren jedoch nicht in Frage kommen,

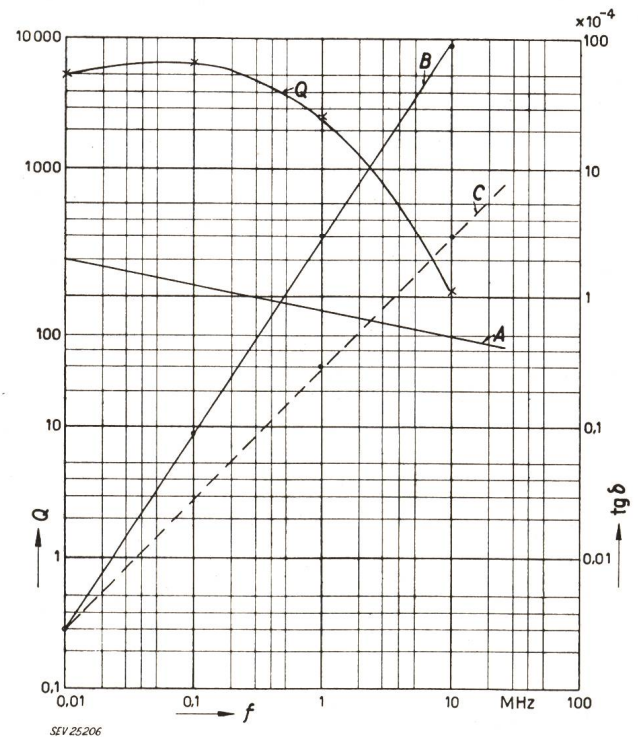


Fig. 6

Verluste eines Glimmerkondensators in Funktion der Frequenz

A dielektrische Verluste; B Verluste in Armaturen und Zuleitungen mit Wirbelstromverluste; C Verluste in Armaturen und Zuleitungen ohne Wirbelstromverluste; Q Gütefaktor; $\text{tg} \delta$ Verlustfaktor; $C = 1000 \text{ pF}$; $R_0 = 0,005 \text{ } \Omega$; $n = 0,83$

steigt der Verlustwinkel mit der Frequenz an; bei Glimmerkondensatoren mit $n < 1$ hingegen nimmt er ab. In Fig. 6 sind für einen Glimmerkondensator von 1000 pF die verschiedenen Verluste dargestellt. Der Gütefaktor Q nimmt bei hohen Frequenzen rasch ab, was hauptsächlich den Wirbelstromverlusten in den Armaturen zuzuschreiben ist. Bei der Konstruktion eines Hochfrequenzkondensators gros-

ser Leistung ist deshalb ein besonderes Augenmerk auf die Ausbildung und die Oberflächenbehandlung der Armaturen und der Zuleitungen zu richten.

III. Betrachtungen zur Verlustmessung in Funktion der Hochfrequenz bzw. bei 50 Hz

Im allgemeinen geschieht das Messen der Verluste mit Hilfe des *Q*-Meters (Fig. 7) bei einer Spannung der Grössenordnung von einigen Volt. In Wirklichkeit ist ein Hochfrequenzkondensator grosser Leistung einer Spannung ausgesetzt, die mehrere tausend Mal diejenige des *Q*-Meters erreichen kann;



Fig. 7

Messung eines Keramikcondensators C auf dem *Q*-Meter

die auftretenden Hochspannungseffekte (z. B. Randglimmen) können mit dieser Methode also nicht erfasst werden, und es ist auch nicht möglich, etwas über das Verhalten des Kondensators im Betrieb auszusagen.

Zur Bestimmung der Verluste und des Verhaltens bei hoher Spannung und Frequenz stehen folgende, ziemlich komplizierte, Methoden zur Verfügung:

- a) Messung der Dämpfung eines Schwingkreises mit dem zu prüfenden Kondensator, unter Hochspannung;
- b) Messung der Erwärmung bei einer bestimmten Frequenz;
- c) Messung der Verluste in Funktion der Spannung auf der Scheringbrücke bei 50 Hz;
- d) Bestimmung der Ionisationsspannung mit Hilfe geeigneter Apparate.

1. Verlustmessung mittels der Dämpfung eines Schwingkreises unter hoher Spannung

Die Methode zur Messung der Verluste bei hoher Spannung und Frequenz wurde von *L. Rhode* [4] entwickelt und beschrieben. Sie ist auf dem gleichen Grundprinzip wie das *Q*-Meter aufgebaut; angesichts der notwendigen hohen Spannungen ist sie aber bedeutend komplizierter hinsichtlich der Vielzahl von Apparaten und der Handhabung.

Fig. 8 gibt ein Beispiel für Messresultate, die mit einer Messanlage nach Rhode bestimmt wurden. Ein keramischer Scheibenkondensator von 60 pF wurde in Abhängigkeit von der Spannung mit drei verschiedenen Frequenzen belastet [5]; der Einsatz der

Ionisation ist am starken Ansteigen der Verluste zu erkennen, die um so schneller zunehmen, je höher die Frequenz wird.

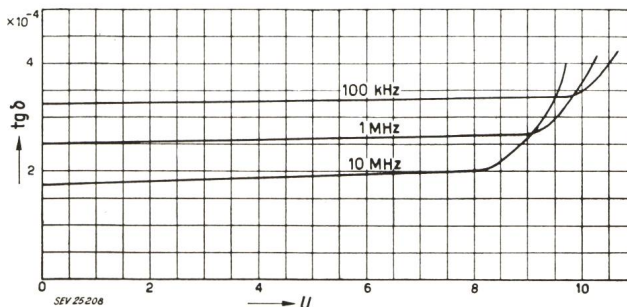


Fig. 8

Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ eines 60-pF-Scheibenkondensators in Abhängigkeit von der Spannung *U* bei verschiedenen Frequenzen

2. Messung der Erwärmung bei einer bestimmten HF-Spannung

Eine viel einfachere und schnellere Methode, die Qualität eines HF-Kondensators zu beurteilen, stellt der Erwärmungsversuch dar. Bei grosser Belastung entstehen an jeder inhomogenen Stelle des Dielektrikums Sprühverluste, die zu rascher örtlicher Erwärmung am Kondensator führen und es erlauben, schlechte Stücke rasch auszuschneiden. Eine solche Prüfanlage zeigt Fig. 9.

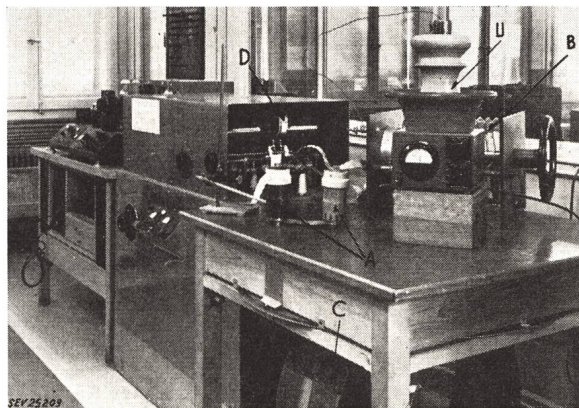


Fig. 9

Endstufe eines 1,5-kW-Senders, gebaut für Erwärmungsversuche an Kondensatoren

A Prüflinge; B Abstimmkondensator; C variable Schwingkreisinduktivität; D Ankopplungsspule; U Hochspannungsvoltmeter

Ein typisches Beispiel eines Keramikcondensators mit fehlerhafter Masse zeigt Fig. 10. Dieser Kondensator wurde infolge starker örtlicher Erwärmung bei der Stelle *A*, 30 s nach Anlegen der Nennlast gesprengt. Vorher durchgeführte Messungen auf dem *Q*-Meter förderten keinen Fehler zu Tage, da infolge der niedrigen Spannung die Intensität des elektrischen Feldes viel zu klein war.

3. Messung der Verluste in Funktion der 50-Hz-Spannung mit der Scheringbrücke

Die Scheringbrücke gestattet es, die Verluste in Funktion der 50-Hz-Spannung zu messen. Diese

Methode ergibt die gleichen Resultate, wie sie unter Kapitel III, Abschnitt 1, beschrieben wurden, mit dem Unterschied, dass sie sehr zeitraubend ist. Um zu einem Resultat zu gelangen, muss eine grosse Zahl von Messwerten in Funktion der Spannung bestimmt werden.

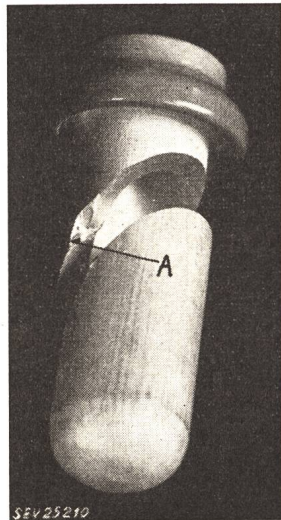


Fig. 10
Topfkondensator, gesprengt durch eine Inhomogenität A unter hochfrequenter Hochspannung

4. Bestimmung der Ionisationsspannung

Zur Bestimmung des genauen Einsatzpunktes der Ionisation gibt es eine ganze Reihe Apparate, die auf der Basis des Erfassens und Verstärkens der durch Entladungen hervorgerufenen Störungen arbeiten. Solche Apparate sind sowohl für Gleich- als auch für Wechselspannung erhältlich und haben den Vorteil, rasch zu arbeiten. Der Ionisationspunkt wird durch Steigern der am Prüfkondensator angelegten Spannung bestimmt. Bei einfachen Apparaten zeigt ein Lautsprecher das Ionisationsgeräusch an; kompliziertere Geräte arbeiten mit einem Kathodenstrahloszillograph, deren auf die Röhre projizierte Ellipse bei einsetzender Ionisation stark verzerrt wird (Fig. 11) [6].

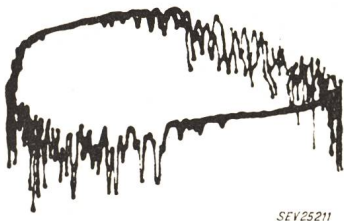


Fig. 11
Verzerrung der Ellipse bei Ionisationserscheinungen

Das Prinzip einer solchen Apparatur ist in Fig. 12 dargestellt. Ein ionisationsfreier Transformator F speist über ein Filter D den Prüfling B. Die Koppelung an den Messverstärker geschieht mit einem ebenfalls ionisationsfreien Kondensator C. Am Eingang des Verstärkers V ist das Anpassungsfilter T; alle Apparate speisen den Kathodenstrahloszillographen KO, auf dessen Röhre die durch die Ionisation deformierte Ellipse erscheint.

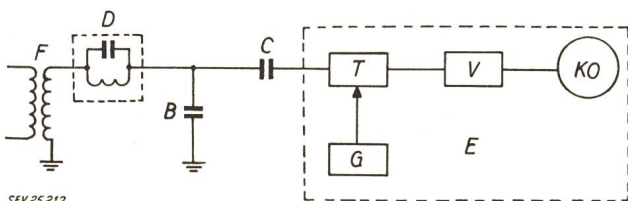


Fig. 12
Blockschema des Ionisationstesters
B Prüfling; C Kopplungskondensator; D Filter; E Ionisationsprüfgerät; F Transformator; G Eichgenerator; T Verbindungseinheit; V Breitbandverstärker; KO Kathodenstrahlröhre

IV. Bestimmungen der Maximalleistung

Die in einem Kondensator in Wärme umgesetzte Verlustleistung P_v berechnet sich zu

$$P_v = U^2 \omega C \cdot \text{tg} \delta \tag{12}$$

wobei in die Gleichung der Verlustfaktor ($\text{tg} \delta$) bei Nennspannung eingesetzt wird.

Bei der Festlegung der Maximalleistung eines Kondensators muss seine Erwärmung berücksichtigt werden, da das Überschreiten einer gewissen Höchsttemperatur zur raschen Zerstörung führen kann. Die im Kondensator während der Zeit dt erzeugte Wärmemenge Q summiert sich aus der im Kondensator selbst erzeugten Wärme und jener Wärme, die durch die Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta$ zwischen Kondensator und Umgebung abgestrahlt wird.

$$dQ = mc d\vartheta + A \alpha \Delta \vartheta dt \tag{13}$$

Darin bedeuten:

- m Masse des Kondensators;
- c spezifische Wärme;
- A wärmestrahlende Oberfläche des Kondensators;
- α Wärmeübergangszahl;
- Q Wärmemenge;
- t Zeit.

Für das thermische Gleichgewicht ist $d\vartheta = 0$. Damit wird die maximale Temperaturdifferenz

$$\Delta \vartheta_{max} = \frac{Q/t}{A \alpha} \tag{14}$$

Der Verlustfaktor $\text{tg} \delta$ ist das Verhältnis von Wirkleistung P zur Blindleistung P_q . Mit den Werten von Gl. (14) wird

$$\text{tg} \delta = \frac{P}{P_q} = \frac{Q/t}{P_q} = \frac{A \alpha \Delta \vartheta}{P_q} \tag{15}$$

Gl. (15) ermöglicht, bei einem Kondensator für eine gegebene Belastung den Verlustfaktor $\text{tg} \delta$ zu berechnen oder umgekehrt.

Berechnungsbeispiel für einen Keramik Kondensator

Gegeben seien:

- $C = 400 \text{ pF}$
- $U_{max \text{ eff.}} = 10 \text{ kV}$
- $\text{tg} \delta_{max} = 2 \cdot 10^{-4}$
- $\Delta \vartheta_{max} = 30^\circ \text{C}$

Die Werte A und α werden berechnet bzw. experimentell bestimmt:

- $A = 350 \text{ cm}^2$
- $\alpha = 15 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2 \cdot ^\circ \text{C}$

Daraus ergibt sich die maximale Wärmeleistung:

$$Q_{max/t} = 350 \cdot 15 \cdot 10^{-4} \cdot 30 = 15,8 \text{ W}$$

Unter Verwendung der Gl. (15) kann man die für den Kondensator zulässige maximale Blindleistung bestimmen:

$$P_q = \frac{Q_{max}}{\text{tg} \delta_{max}} = \frac{15,8}{2 \cdot 10^{-4}} = 79 \text{ kVar}$$

Der Verlustfaktor $\text{tg} \delta$ dieses Kondensators in Funktion der Frequenz f ist in Fig. 13 aufgetragen. Man sieht rasch, dass der Wert von $\text{tg} \delta$ stark schwankt; von 3 MHz an ist der Einfluss der Armaturen deutlich sichtbar.

Dieser Einfluss bedingt eine Begrenzung der Kondensatorleistung in Funktion der Frequenz.

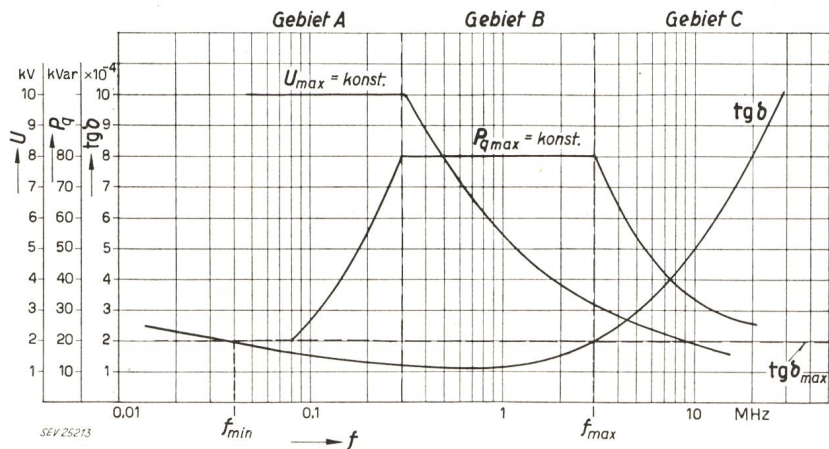
Eine andere Beschränkung erfordert die maximale Betriebsspannung, dies vor allem für tiefere Frequenzen. Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass zwischen 3 Leistungsgebieten unterschieden werden muss (vgl. Fig. 13):

- Gebiet A: reduzierte Leistung, bedingt durch die begrenzte Spannung.
- Gebiet B: maximale Leistung, minimale Verluste, rationellste Verwendung.

Fig. 13

Verhalten eines Keramikcondensators in Funktion der Frequenz

- Gebiet A: Begrenzung durch die maximale Spannung U_{max}
- Gebiet B: Begrenzung durch die maximale Blindleistung P_{qmax}
- Gebiet C: Begrenzung durch den maximalen Verlustfaktor $tg \delta_{max}$



Gebiet C: reduzierte Leistung, Begrenzung infolge Armaturenverluste.

Zur Bestimmung der Charakteristiken von belasteten Kondensatoren ist ein Sender, wie ihn Fig. 9 als Beispiel darstellt, unentbehrlich.

V. Eigenschaften einiger für hohe Frequenzen und Leistungen verwendeter Kondensatoren

1. Pressgaskondensatoren

Bei Pressgaskondensatoren wird als Dielektrikum Gas, meistens Kohlensäure (CO₂) oder Stickstoff (N₂), unter relativ hohem Druck verwendet. Die Durchschlagspannung U_d zwischen zwei Platten steigt in Funktion des Gasdruckes relativ stark an. In Fig. 14 ist sie, sowie die Dielektrizitätskonstante

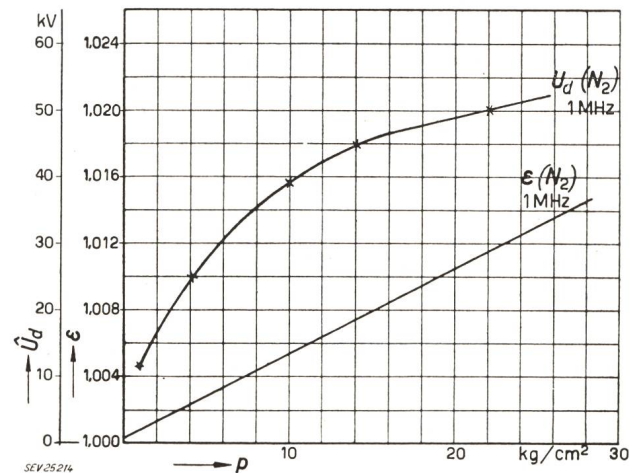


Fig. 14

Durchschlagspannung \hat{U}_d und Dielektrizitätskonstante ϵ eines Pressgaskondensators in Funktion des Druckes p bei 1 MHz

eines Pressgaskondensators von 7 mm Plattenbestand und N₂ gefüllt, in Funktion des Gasdruckes dargestellt. Oberhalb 20 kg/cm² wird der Vorteil der nur langsam steigenden Durchschlagspannung gegenüber den Mehrkosten für das druckfeste Gefäß unwirtschaftlich. Die Dielektrizitätskonstante ϵ steigt linear mit dem Druck an, und bei konstant

gehaltener Temperatur beträgt die Zunahme pro 1 kg/cm² Druckerhöhung:

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/cm}^2$$

Neuerdings werden Pressgaskondensatoren auch mit Schwefel-Hexafluorid SF₆ gefüllt, dessen Dielektrizitätskonstante um 2,3...2,5mal höher ist als jene von N₂ oder CO₂. Der Schmelzpunkt liegt bei diesem neuen Dielektrikum bei -50,8°C, die kritische Temperatur bei 45,6 °C und der kritische Druck bei 38 kg/cm². Die Durchschlagspannung in einem homogenen Feld bei 6-mm-Plattenabstand ist bei Verwendung von SF₆ doppelt so hoch als bei N₂.

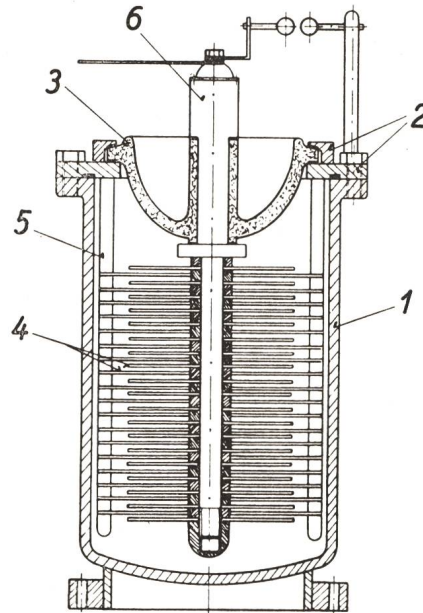


Fig. 15

Schnitt durch einen Pressgaskondensator
1 Kondensator kübel; 2 Kondensatordeckel; 3 Isolator;
4 Kondensatorplatten; 5 Plattenhalter

Den Aufbau eines Pressgaskondensators zeigt Fig. 15. In einem Anticorodalkübel 1 mit aufgeschraubtem Deckel 2 und einer Porzellandurchführung 3 ist der aktive Teil des Kondensators, bestehend aus auf Hochglanz polierten Metallscheiben 4, untergebracht. Die grösseren Platten sind durch eine Metallstange 5 miteinander verbunden und sind

zusammengestellt. Die maximale effektive Spannung beträgt 40 kV und die maximale Leistung ($P_{q\ max}$) ist durch die Erwärmung des Kondensatorkopfes und Isolators gegeben.

In Sendeanlagen können auch Kleinpressgaskondensatoren verwendet werden. Fig. 17 zeigt einen Typ von 700 pF, 40 A und 150 kVar im Grössenvergleich mit einem 15 cm langen Rechenschieber.

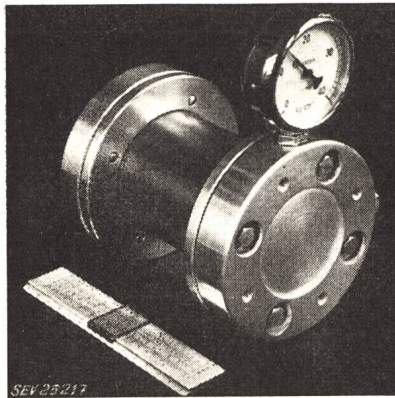


Fig. 17
Pressgaskondensator für 150 kVar, 40 A, 700 pF

2. Vakuum-Kondensatoren

Ausgehend von der Röhrentechnik sind vor allem amerikanische aber auch europäische Firmen dazu übergegangen, Kondensatoren in Hochvakuum herzustellen. Sie sind unempfindlich gegen Schwankungen der Umgebungstemperatur, des Luftdruckes und der Luftfeuchtigkeit und können mechanisch robust und mit grosser Konstanz der Kapazität hergestellt werden. Das Hochvakuum gewährleistet auch eine hohe innere Durchschlagfestigkeit. Theoretisch ist der Kondensator verlustfrei; praktisch treten kleine Verluste in den Zuführungen sowie im Glas auf. Die lange Lebensdauer ist dem Hochvakuum zu verdanken, das höchstens durch Gaseinschlüsse in den Elektroden verschlechtert wird, weshalb der richtigen Auswahl und Behandlung des Elektrodenmaterials grosse Bedeutung zukommt. Das Vakuum wirkt bei einem inneren Überschlagn

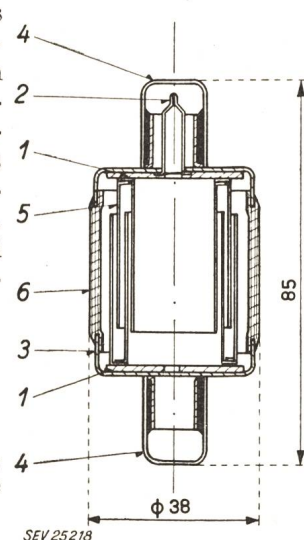


Fig. 18
Schnitt durch einen Vakuumkondensator
1 Stahlplatte; 2 Saugstutzen; 3 Kovarring; 4 Kappe; 5 innere Elektrode; 6 Glaskörper

lichtbogen selbstlöschend. Äussere Überschläge können bei reduziertem Aussendruck, z. B. in grossen Höhen auftreten; Undichtheiten zu inneren Durchschlägen führen. Alle Eigenschaften von Vakuumkondensatoren wurden in den letzten Jahren wesentlich verbessert [8].

Fig. 18 zeigt einen Schnitt durch einen Vakuumkondensator von 50 pF und 5 A der Western Electric Co. Die Cu-Elektroden 5 sind durch Punktschweissung an einer Stahlplatte 1 befestigt. Ein Ring aus Kovarmetall 3, der in den Glaskörper 6 eingeschmolzen ist, verbindet Platte und Glas. Im Verlaufe des Evakuierungsprozesses wird der Kondensator während 3 h auf ca. 400°C erhitzt und anschliessend wiederholten Stromstössen ausgesetzt, und zwar so oft bis bei einer bestimmten Spannung keine inneren Entladungen mehr auftreten. Schliesslich wird das Ba-Getter abgeschmolzen und der fertige Kondensator durch den Saugstutzen 2 verschlossen.

Im Betrieb macht sich vielfach ein sogenannter «Reinigungseffekt» bemerkbar, d. h. es entstehen kurzdauernde Durchschläge zwischen den Elektroden. Ursachen hierfür sind Gaseinschlüsse im Elektrodenmaterial oder auch im Glaskörper. Man versucht deshalb eine bessere Entgasung zu erreichen und verwendet als Elektrodenmaterial besser geeignete Metalle als Kupfer, z. B. Nickel oder Tantal.

Der Temperatur-Koeffizient des Kondensators beträgt $+ 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, und die Betriebstemperatur kann bis 150°C gesteigert werden.

Ein 25-pF-Kondensator für 20 kV Betriebsspannung und einen Betriebsstrom von maximal 60 A bei 27 MHz, nimmt eine Leistung von 80 kVar auf und ist bei einem Durchmesser von 75 mm, 90 mm hoch. Fig. 19 zeigt einen solchen variablen Vakuumkondensator mit einer Kapazität von 15...80 pF für effektiv 22 kV Betriebsspannung.

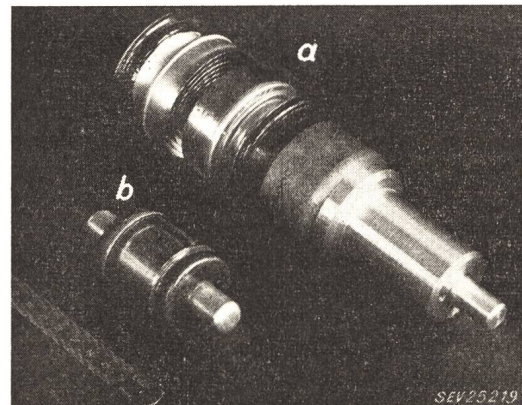


Fig. 19
Variabler a und fester b Vakuum-Kondensator

Ein Vergleich der verschiedenen Kondensatortypen mit Gas, Luft und Glimmer-Dielektrikum zeigt, dass der Vakuumkondensator für eine bestimmte Leistung besonders durch sein kleineres Gewicht allen andern Kondensatoren überlegen ist.

3. Keramische Kondensatoren

Keramische Kondensatoren in Topf- oder Plattenform sind im Senderbau besonders gut geeignet, können sie doch mit kleinen dielektrischen Verlusten, kleiner Induktivität und bestimmten Temperaturkoeffizienten für hohe HF-Spannungen hergestellt werden. Eine Zusammenstellung der keramischen Massen nach Tab. III zeigt, dass die Gruppe I mit

Zusammenstellung von keramischen Massen

Tabelle III

Dielektrizitätskonstante ϵ	Temperaturkoeffizient $\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} / ^\circ\text{C} \times 10^{-6}$	Grundmaterial	Markennamen in verschiedenen Ländern			
			USA Schweiz	Grossbritannien	Deutschland	Frankreich
<i>Gruppe I: $\text{tg } \delta < 10 \cdot 10^{-4}$</i>						
8,5	+ 130	Steatit Speckstein Magnesium-Silikat		Calit Frequelex Frequentite	Calit Callan Rosalt 7	M 8 Tagentite
15	+ 100	Magnesium-Titanat	P 100 (P 90)	Tempa S Templex Tempadex	Tempa S	
20	0 - 30	Magnesium-Titanat und andere Beimengungen	NPO	Tempa T	Tempa T	TM 20 TM 30
35	- 30 - 100		N 80		Kerofar X	TZ 32
40...45	- 330 - 470		N 330 N 470	— —	Kerofar U Rosalt 50 Condensa N	T 45
65...70 85...100	- 700 - 750	Titandioxyd	N 750	Permalex Conda C Faradex	Rosalt 85 Kerofar VW Condensa C	Faradite TA 65-T80
150	- 1400	Calcium-Titanat	N 1400			TC 150
220	- 3000	Strontium-Titanat	N 3000			
<i>Gruppe II:</i>						
1000	variabel	Barium-Titanat	VMG	H. K.	TB 1000 TB 5000 D 10000	
10000			High K			

relativ kleinen Dielektrizitätskonstanten sich besonders zur Herstellung von Kondensatoren mit gewünschten Eigenschaften eignen. Gruppe II ergibt wohl Kondensatoren mit sehr hohen Kapazitäten auf Grund von grossen Dielektrizitätskonstanten, jedoch ändern Kapazität und Verlustfaktor sehr stark mit der Temperatur, der Spannung, der Zeit und der Frequenz, so dass sie sich für die Verwendung in Sendern nicht eignen. Die Bezeichnung der Massen ändert je nach Fabrikat und Land. Für Leistungskondensatoren verwendet man Massen mit Dielektrizitätskonstanten $\epsilon = 16 \dots 18$ und $\epsilon = 80 \dots 90$. Diese besitzen einen Temperaturkoeffizienten von $\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} / ^\circ\text{C} = + 90 \cdot 10^{-6}$ bzw. $- 750 \cdot 10^{-6}$ mit den Bezeichnungen P 90 und N 750. Wie Fig. 20 zeigt, ist

der Temperaturkoeffizient von der Dielektrizitätskonstante abhängig.

Fig. 21 und 22 zeigen die Abhängigkeit der Änderung des Verlustfaktors in Funktion der Temperatur und der Frequenz von beiden Massen. Man sieht, dass diese Werte der Masse P 90 niedriger sind, als diejenigen der Masse N 750. Kondensatoren hergestellt aus der Masse P 90 können deshalb höher belastet werden. Versuche zeigten, dass eine Temperaturerhöhung $\Delta\theta$ von 50°C beim dauernden Betrieb mit einer HF-Leistung zulässig ist, ohne dass die Verluste $10 \cdot 10^{-4}$ übersteigen. Bei weiterer Erhöhung dieser Werte kann sich besonders bei der Masse N 750 eine Wärmeaufschaukelung ausbilden, die zur Zerstörung des Kondensators führt. Die

Eigenschaften von verschiedenen Keramik-Kondensatortypen

Tabelle IV

Typ	Masse		Temperaturkoeffizient $\times 10^{-6}$	Masse P 90			Masse N 750							
	Durchmesser mm	Länge mm		Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ bei 1 MHz	Leistung kVar	Maximaler Strom A	Temperaturkoeffizient $\times 10^{-6}$	Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ bei 1 MHz	Leistung kVar	Maximaler Strom A				
CCA	22	40	} $90 \begin{matrix} +10 \\ -50 \end{matrix}$ }	} $< 10^{-3}$ }	} 8	} 6	} $-750 \begin{matrix} + 50 \\ -150 \end{matrix}$ }	} $< 10^{-3}$ }	} 3,5	} 5				
CCB	22	60									12	8	5	5
CCC	32	67									16	10	6	8
CCD	32	102									26	10	10	10

Temperatur bis 100°C ; Betriebsspannung 7,5 kV HF bzw. 10 kV

maximale Betriebstemperatur ist deshalb auf 100 °C begrenzt.

Tabelle IV gibt Auskunft über die Eigenschaften von 4 Keramik-Kondensatortypen der Condensateur Fribourg S.A. Andere Ausführungen können

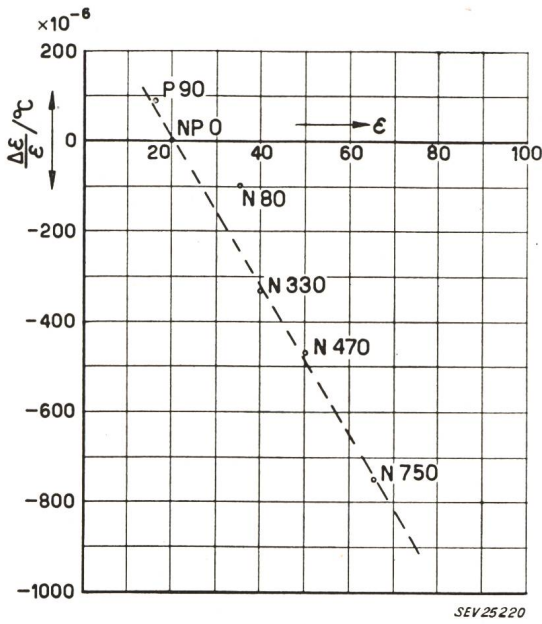


Fig. 20

Änderung des Temperaturkoeffizienten $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} / ^\circ C$ in Funktion der Dielektrizitätskonstante ϵ für verschiedene Keramikmassen

bis zu einer Leistung von 80 kVar und einem maximalen Strom von 35 A verwendet werden. Die Telegraph Condenser Co. in England stellt Kondensatoren in Rohrform her für 150 kVar Leistung und 70 A maximalen Betriebsstrom mit künstlicher

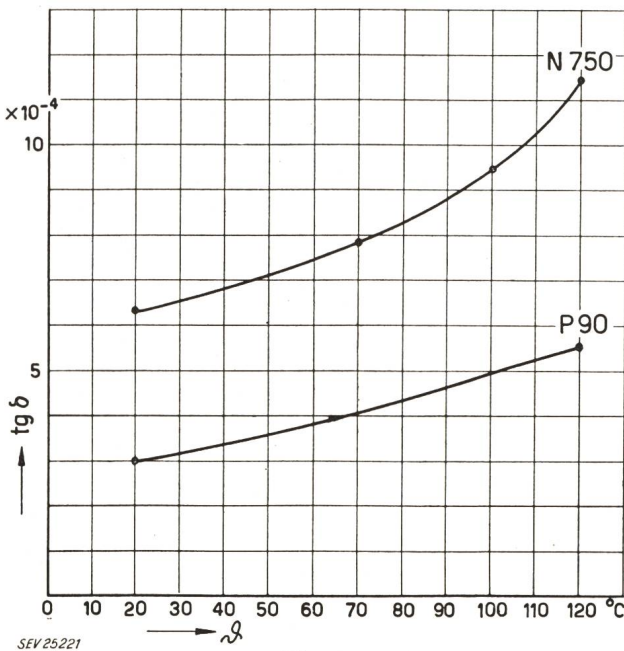


Fig. 21

Änderung des Verlustfaktors $tg \delta$ in Funktion der Temperatur θ bei den Massen N 750 und P 90

Kühlung. Kondensatoren in Plattenform, wie sie von deutschen Firmen hergestellt werden, eignen sich besonders für den Aufbau grosser Batterien.

Bei der Herstellung keramischer Leistungskondensatoren ist die Verteilung des elektrischen Feldes am Rande der Elektroden ein sehr wichtiges Problem. Fig. 23 zeigt einen Schnitt der Randzone eines Keramik-Topfkondensators. Der äussere Be-

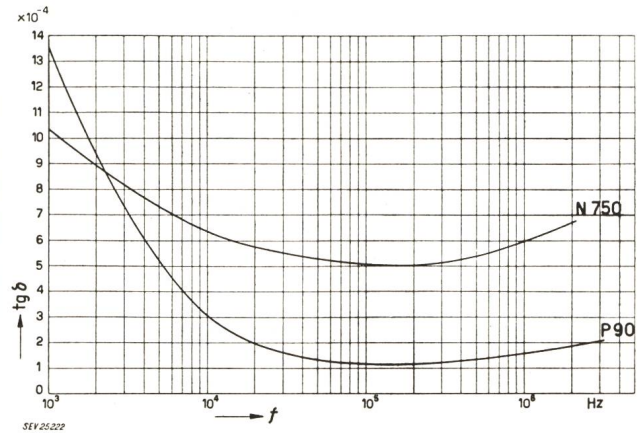


Fig. 22

Änderung des Verlustfaktors $tg \delta$ in Funktion der Frequenz f bei den Massen N 750 und P 90

lag, meist aus Silber bestehend, muss bis zum Punkt B verlängert werden, um zu vermeiden, dass infolge schlechter Feldverteilung schon unterhalb der Betriebsspannung Sprühen auftritt [9].

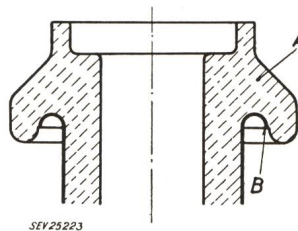


Fig. 23

Ausbildung der Randzone eines Keramik-Topfkondensators
A keramischer Körper; B Rand

4. Glimmerkondensatoren

Die Hochleistungs-Glimmerkondensatoren bestehen aus aufeinandergeschichteten Glimmerplatten von 30...60 μm Dicke, in welche die Metallarmaturen zwischen die einzelnen Platten eingelegt

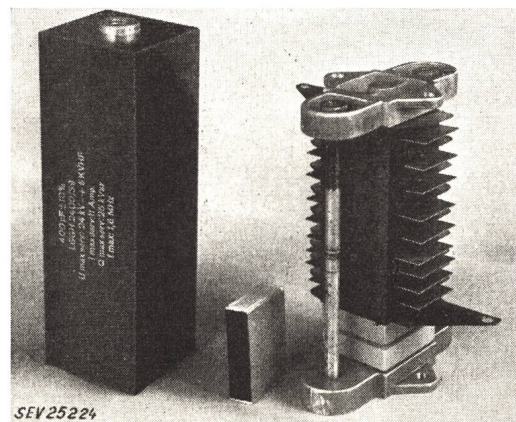


Fig. 24

Glimmerkondensatoren

sind (Fig. 24). Je nach Spannungs- und Stromverhältnissen werden einzelne Plattenpakete parallel oder in Serie geschaltet. Die Gleichspannung sollte

dabei 1200 V und die HF-Spannung 350 V Scheitelwert pro Glimmerplatte nicht überschreiten, um Ionisationserscheinungen zu vermeiden. Fig. 24 zeigt rechts einen Kondensator mit folgenden Angaben: 1000 pF, 19 Pakete in Serieschaltung, Betriebsspannung 23 kV Gleich- oder 6,6 kV HF-Spannung. Diese Ausführung hat den Nachteil, dass sich im Betrieb Feuchtigkeit und Staub auf den Kondensator absetzt und so seine Qualität verschlechtert. Als Feuchtigkeitsschutz wird vielfach der Kondensator in einen Keramiktopf eingebaut, mit Öl gefüllt und dicht verschlossen (Glimmertopf-kondensator, siehe auch C_4 in Fig. 2). In neuester Zeit werden solche Kondensatoren in Kunstharz eingegossen (vgl. Fig. 24). Sie haben den Vorteil, dicht, feuchtigkeitssicher und mechanisch robust zu sein.

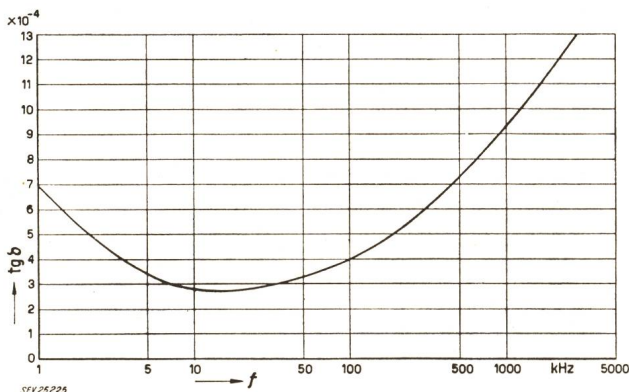


Fig. 25

Änderung des Verlustfaktors $\text{tg } \delta$ in Funktion der Frequenz f eines mit Kunstharz umgossenen Glimmerkondensators
 Betriebsdaten: 400 pF, 24 kV Gleichspannung bzw. 6 kV HF-Spannung

Aus Fig. 25 sind die Verluste eines 400-pF-Kondensators (s. Fig. 24, links) ersichtlich in Abhängigkeit von der Frequenz. Die maximale Betriebsspannung dieses Kondensators beträgt bei 39 in Serie geschalteten Paketen 49 kV Gleichspannung oder effektiv 13,5 kV HF-Spannung. Selbstverständlich sind gemischte Spannungsarten zulässig, z. B. 24 kV Gleichspannung + 6 kV HF, wie auch der Aufdruck

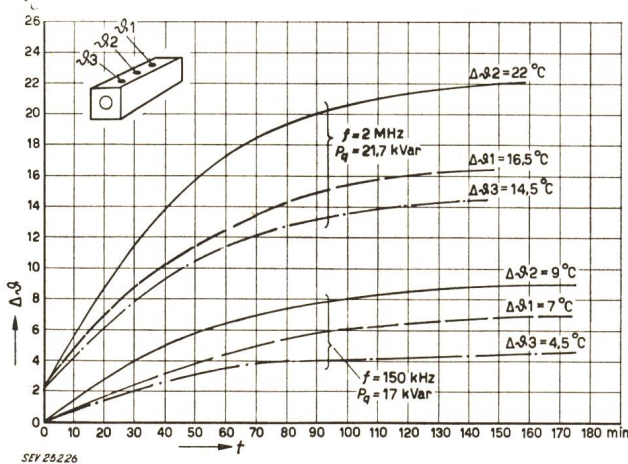


Fig. 26

Erwärmungskurven eines mit Kunstharz umgossenen Glimmerkondensators, gemessen an verschiedenen Orten und bei verschiedenen Frequenzen
 $\Delta\theta$ Erwärmung; t Zeit

des Kondensators zeigt. Wie aus der Verlustkurve ersichtlich ist, sind die Verluste bei niedriger Frequenz infolge höherer dielektrischer Verluste gross. Bei hohen Frequenzen dagegen beginnen die Leitungsverluste in den Metallarmaturen den Verlustfaktor ebenfalls ungünstig zu beeinflussen.

Fig. 26 zeigt, dass bei richtiger Bemessung des Kondensators seine Erwärmung, gemessen an 3 verschiedenen Punkten, bei bestimmten Frequenzen, 30°C nicht überschreitet. Durch künstliche Kühlung kann selbstverständlich unter Umständen die maximal zulässige Leistung gesteigert werden.

5. Polystyrolkondensatoren

Im Temperaturbereich bis 70°C hat sich auch der Polystyrolkondensator für Hochfrequenzbelastung eingeführt. Die Stabilität der Kapazität von Polystyrol ist nach 10 Temperaturzyklen von 20...70°C kleiner als 1‰, und der Temperaturkoeffizient des Kondensators beträgt $-150 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Der Verlustwinkel ist mit $1 \cdot 10^{-4}$ bis zu hohen Frequenzen hervorragend, und die Zeitkonstante kann bei max. 60°C bis 10⁷ s betragen. In Fig. 27 sind einige induk-

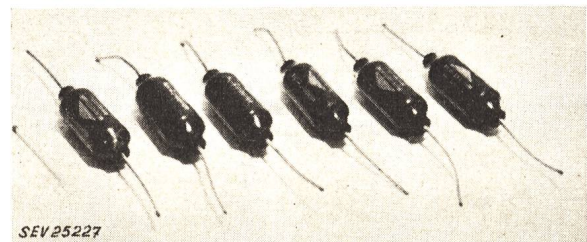


Fig. 27

Polystyrolkondensatoren für HF-Belastung

tionsfreie Kondensatoren mit Litzendrahtausführung von 20000 pF dargestellt. Sie können mit effektiv 500 V, 150 kHz und einer Leistung von 4,7 kVar belastet werden, wobei der Temperaturanstieg im Kondensator nur 3°C beträgt. Bei höheren Frequenzen zwischen 1 und 10 MHz steigen dann die Verluste stark an, und die Grenzleistung muss auf 0,1...0,3 kVar reduziert werden.

Zusammenfassung

Aus diesen Ausführungen ist ersichtlich, dass eine grosse Reihe von Kondensatortypen zur Verfügung steht, die den sehr hohen Anforderungen in der Hochfrequenztechnik Genüge leisten können. Mittels der heute im Kondensatorbau verwendeten Dielektrika und modernen Fabrikationsmethoden ist eine weitere Entwicklung möglich. Um eine gute und vor allem auch wirtschaftliche Ausnützung aller wichtigen Faktoren, wie Frequenzbereich, Betriebstemperatur, Spannungsbeanspruchung, Strom und Preis zu erreichen, ist es oft unerlässlich, sich vor der Festlegung auf einen bestimmten Typ mit dem Hersteller von Kondensatoren in Verbindung zu setzen.

Literatur

- [1] Rundfunksender. Brown Boveri Mitt. Bd. 40(1935), Nr. 10.
- [2] Hartmann, W.: Über das Verhalten von Kondensatoren bei Hochfrequenz. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 6, S. 258...262.

Fortsetzung des allgemeinen Teils auf Seite 259
 Es folgen «Die Seiten des VSE»

Fortsetzung von Seite 246

Eigenschaften von Kondensatoren für grosse Hochfrequenzleistungen (Fortsetzung)

- [3] *MacLeod, H. J.*: The Variation with Frequency of the Power Loss in Dielectrics. Phys. Rev. Serie 2, Bd. 21(1923), Nr. 1, S. 53...73.
- [4] *Rhode, L. und G. Wedemeyer*: Die Messung von Verlusten bei Hochspannung hoher Frequenz. ETZ Bd. 61(1940) Nr. 26, S. 577...581.
- [5] *Handrek, H.*: Keramische Hochfrequenz-Kondensatoren. ATM Liefg. 62(August 1936), Z 136-1, Bl. T 112...113.

- [6] *Whithead, S.*: Dielectric Breakdown of Solids. Oxford: Clarendon Press 1951.
- [7] *Gänger, B.*: Der Hochfrequenzdurchschlag verdichteter Gase. Arch. Elektrotechn. Bd. 37(1943), Nr. 6, S. 267...286.
- [8] *Borgars, S. J.*: Development of Vacuum Capacitors. Proc. Instn. Electr. Engrs. Bd. 99(1952), Part III, Nr. 61, S. 307...315.
- [9] *Danzin, A.*: Les condensateurs à diélectrique «céramique». Performances et caractéristiques d'utilisation. Ann. Radio-électr. Bd. 6(1951), Nr. 24, S. 156...179.

Adresse des Autors:
R. Römer, Dipl. Ing. ETH, 6, rue Simplon, Fribourg.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Heisswasser-Reaktor mit automatischer Regelung

621.039.42

[Nach C. F. Leyse: Automatic-Boiling-Column Reactor. Nucleonics Bd. 14(1956), Nr. 7, S. 42...45]

Der vorgeschlagene Reaktor besteht im Prinzip aus einem zylindrischen Reaktortank mit einem Wassereinfluss unter der Füllung und einem Dampfablass oberhalb derselben. Das

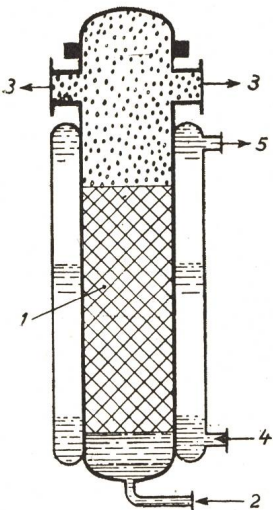


Fig. 1
Automatisch geregelter Heisswasserreaktor
(in der englischen Abkürzung oft ABC-Reaktor genannt)
Bei diesem Reaktortyp ist im Gegensatz zu den üblichen Heisswasser-Reaktoren die Füllung nur teilweise im Wasser. Die Regelung geschieht ohne Stäbe, nur mit der Fördermenge der Speisepumpe (Wasserstand)
1 Reaktorkern; 2 Wasserzuleitung; 3 Ausgänge für Dampf; 4 Wasserzuleitung zum Reflektor; 5 Wasserausgangsleitung vom Reflektor

sprunghaft an. Die Startschnelligkeit ist in erster Linie eine Funktion der Fördermenge der Speisepumpe. Im gleichförmigen Betriebszustand wird der untere Reaktorteil durch den Entzug der Verdampfungswärme gekühlt, während der obere Teil sich in einem Dampf-Wasser-Gemisch befindet. Steigende Energieproduktion bedeutet steigende geförderte Speisewassermenge und umgekehrt. In einem Versuchsreaktor (SPERT-1) wurde das Verhalten eines Heisswasserreaktors ohne Regelstäbe untersucht. Mit der Wasserzufuhr kann die ganze Regelung durchgeführt werden. Besonders darauf ist ferner geachtet worden, dass die Temperaturen der Füllstäbe, die während des Startes oder des Betriebes aus dem Wasser kommen, nicht übermässig ansteigen. Fig. 2 zeigt die wesentlichen Ergebnisse. Die Anlaufzeit beträgt 3,1 s, wobei die Leistung von 0...550 kVA hochgeht. Die Temperatur an beiden Thermoelementen nähert sich in einigen Minuten dem nach dem herrschenden Druck vorgegebenen Wert. Der beschriebene Reaktor muss im kalten Zustand (keine Energieproduktion) nicht mit kernphysikalischen Messgeräten überwacht werden; man spricht dann von einem «blinden» Start.

Der entscheidende Vorteil liegt darin, dass eine einfache Reaktorregelung entsprechend der Belastungsschwankungen der Dampfturbine eingeführt werden kann. Die Speisepumpe wird mit dem mechanischen Antriebssystem im richtigen Sinne gekuppelt, so dass die geförderte Wassermenge regelnd auf die Energieerzeugung im Reaktor wirkt. Durch diesen einfachen Vorgang kann ein ausserordentlich stabiler Betrieb gewährleistet werden. Dieser Reaktortyp (Automatic-Boiling-Column Reactor oder ABC-Reaktor wie er oft

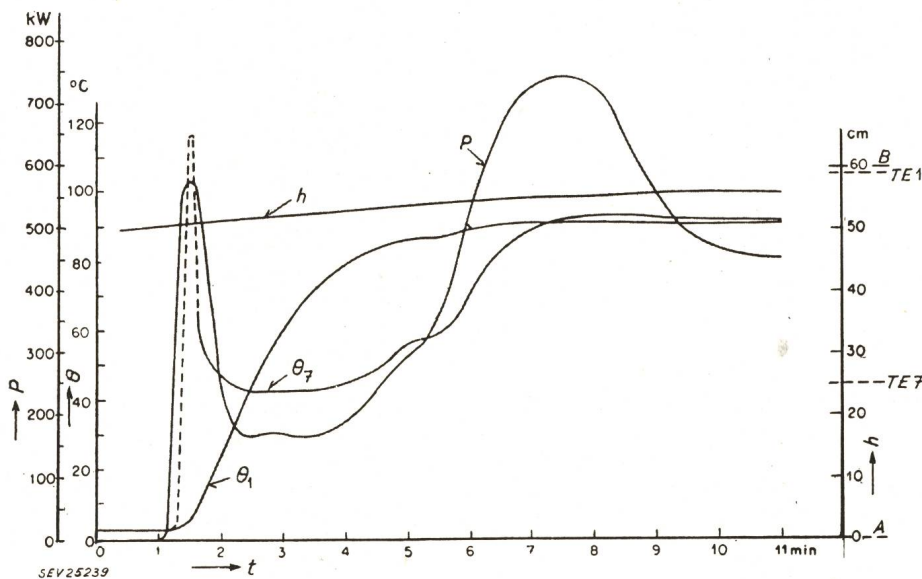


Fig. 2
Startdiagramm des Versuchsreaktors Spert-1
Verlauf der Leistung, der Temperatur und des Wasserniveaus
P Leistung; θ Temperatur; θ_1, θ_7 Temperatur gemessen mit Thermoelement TE1 bzw. TE7; h Wasserniveau; t Zeit; TE 1, TE 7 Lage der Thermoelemente; A untere Kante des Kerns; B obere Kante des Kerns

spaltbare Material kann in Form von Platten, Stäben oder Zylindern hineingebracht werden. Als Neutronenreflektor wird ein getrennter Wassertank benutzt (Fig. 1).

Wird in den leeren Reaktorkessel Wasser hineingepumpt, dann steigt bei der kritischen Wasserhöhe die Leistung

genannt wird) ist ausserdem befähigt, mehr Leistung als die gewöhnlichen Heisswasserreaktoren abzugeben, die wegen den Dichteschwankungen des kochenden Moderators (Wasserfüllung) zu unregelmässiger Leistungsabgabe neigen.

P. Stoll