

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 48 (1957)
Heft: 6

Artikel: Eigenschaften von Kondensatoren für grosse Hochfrequenzleistungen
Autor: Römer, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058666>

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: 14.01.2026

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 Industriegeratoren 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]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

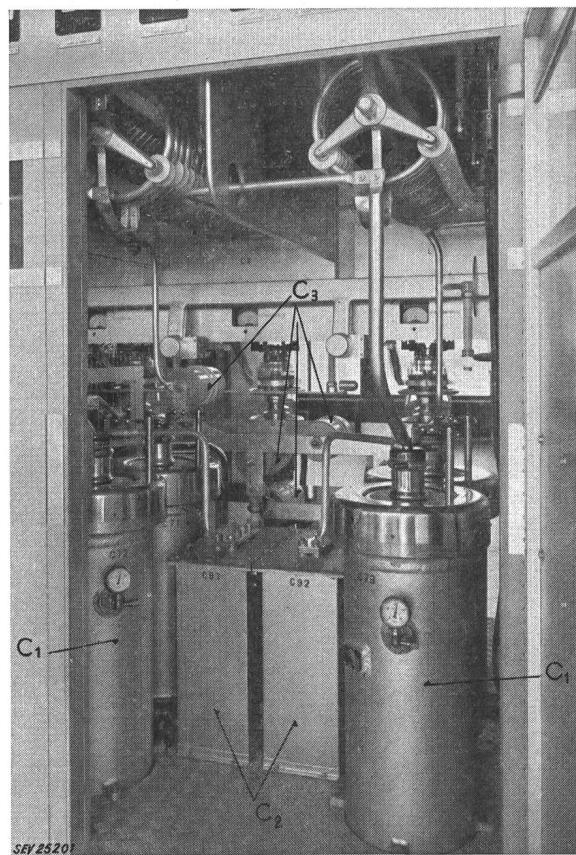


Fig. 1

Frontseite der HF-Stufe eines 200-kW-Senders mit Schwingkreiskondensatoren 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.

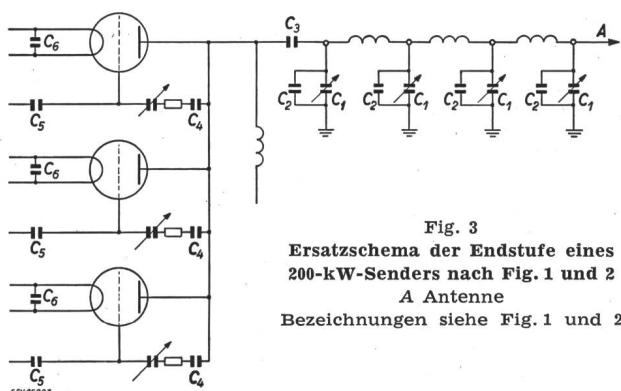
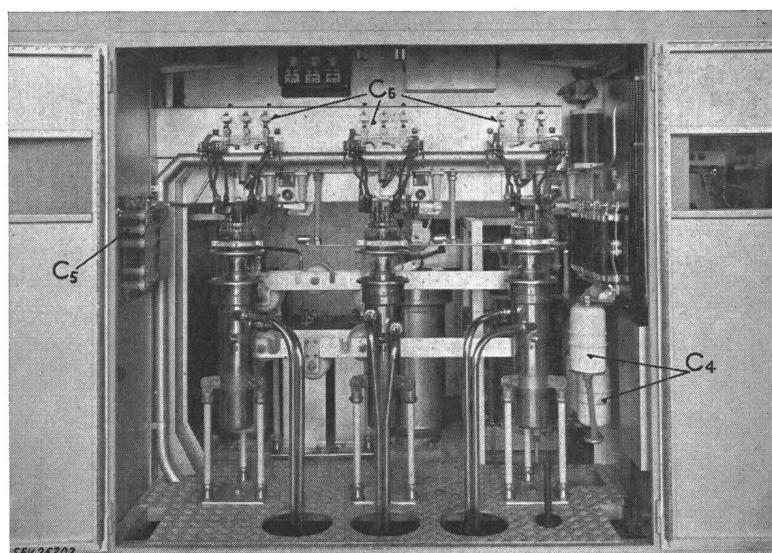
¹⁾ siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Artikels.

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
C₄ Glimmerkondensator in Keramiktopf
C₅ Keramiktopfkondensator
C₆ Luftglimmerkondensator



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 ⁶ Hz	Verlustfaktor $\times 10^{-4}$ bei 10 ⁸ Hz	Ungef. Erweichungspunkt °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	—
Schwefel-Hexafluorid	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:

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

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

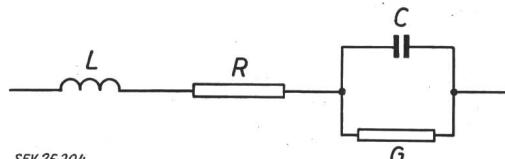


Fig. 4
Ersatzschema eines Kondensators
L Induktivität; R Seriowiderstand; G Leitwert; C ideale Kapazität

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 Schwingkreiskondensator 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 $\operatorname{tg} \delta$ einer Serieschaltung von C_e und R_e in Funktion der Frequenz ist gegeben durch:

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

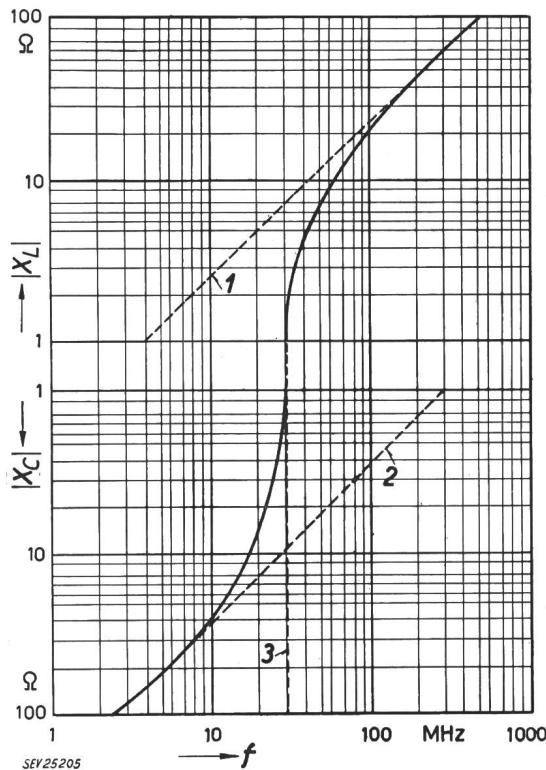


Fig. 5

Verhalten eines Glimmerkondensators in der Umgebung der Resonanzfrequenz

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

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

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

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

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

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 Mac Leod [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:

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

Die Güte Q wird folglich

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

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,

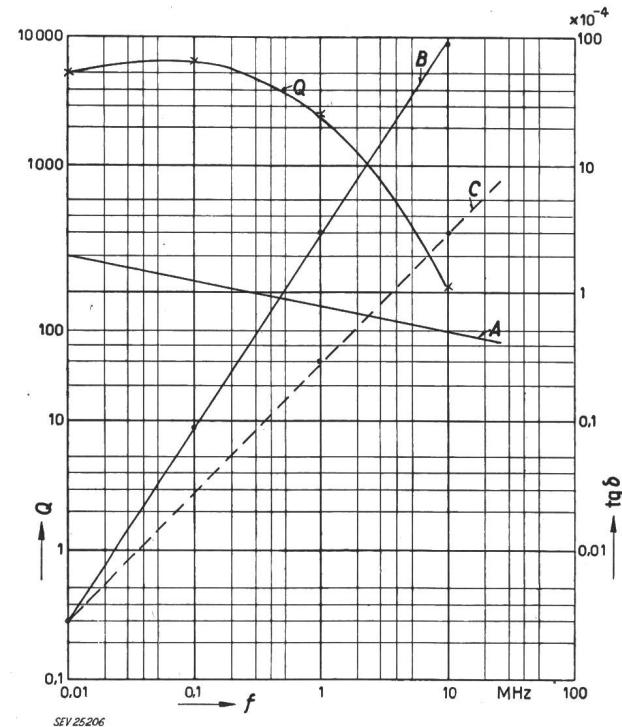


Fig. 6
Verluste eines Glimmerkondensators in Funktion der Frequenz

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

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 Keramikkondensators 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:

- Messung der Dämpfung eines Schwingkreises mit dem zu prüfenden Kondensator, unter Hochspannung;
- Messung der Erwärmung bei einer bestimmten Frequenz;
- Messung der Verluste in Funktion der Spannung auf der Scheringbrücke bei 50 Hz;
- 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.

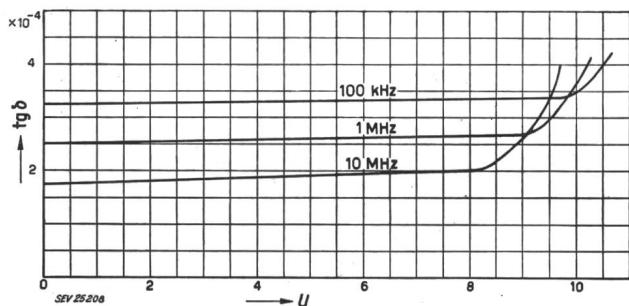


Fig. 8
Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ eines 60-pF-Scheibenkondensators in Abhängigkeit von der Spannung U bei verschiedenen Frequenzen

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.

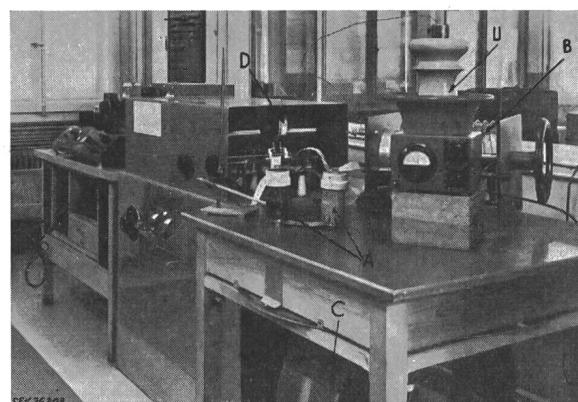


Fig. 9
Endstufe eines 1,5-kW-Senders, gebaut für Erwärmungsversuche an Kondensatoren
A Prüflinge; B Abstimmkondensator; C variable Schwingkreisinduktivität; D Ankopplungsspule; U Hochspannungsvoltmeter

Ein typisches Beispiel eines Keramikkondensators mit fehlerhafter Masse zeigt Fig. 10. Dieser Kondensator wurde infolge starker örtlicher Erhitzung 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.

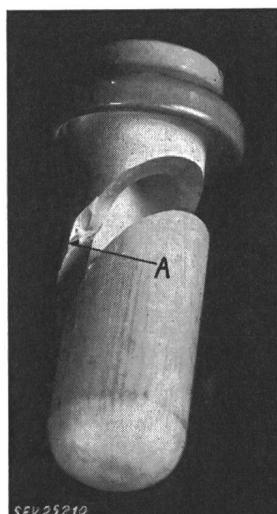


Fig. 10
Topfkondensator, gesprengt
durch eine Inhomogenität A
unter hochfrequenter
Hochspannung

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 Kathodenstrahlloszillograph, deren auf die Röhre projizierte Ellipse bei einsetzender Ionisation stark verzerrt wird (Fig. 11) [6].

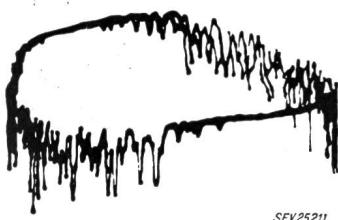


Fig. 11
Verzerrung der Ellipse
bei Ionisations-
erscheinungen

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

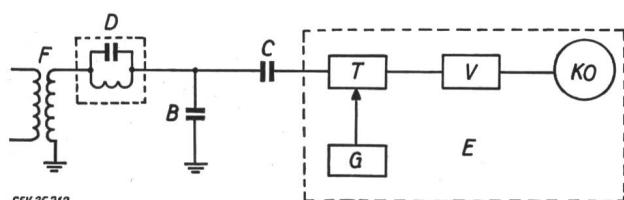


Fig. 12
Blockschema des Ionisationstesters
B Prüfling; C Kopplungskondensator; D Filter; E Ionisations-
prüferät; F Transformator; G Eichgenerator; T Verbindungs-
einheit; V Breitbandverstärker; KO Kathodenstrahlröhre

IV. Bestimmungen der Maximalleistung

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

$$P_v = U^2 \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (12)$$

wobei in die Gleichung der Verlustfaktor ($\operatorname{tg} \delta$) 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.

$$dQ = mc d\vartheta + A \alpha \Delta\vartheta dt \quad (13)$$

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

$$\Delta\vartheta_{max} = \frac{Q/t}{A \alpha} \quad (14)$$

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

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{P_q} = \frac{Q/t}{P_q} = \frac{A \alpha \Delta\vartheta}{P_q} \quad (15)$$

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

Berechnungsbeispiel für einen Keramikkondensator

Gegeben seien:

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

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

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

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:

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

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

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 Keramikkondensators 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 $\operatorname{tg} \delta_{max}$

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 (CO_2) oder Stickstoff (N_2), unter relativ hohem Druck verwendet. Die Durchschlagsspannung U_d zwischen zwei Platten steigt in Funktion des Gasdruckes relativ stark an. In Fig. 14 ist sie, sowie die Dielektrizitätskonstante

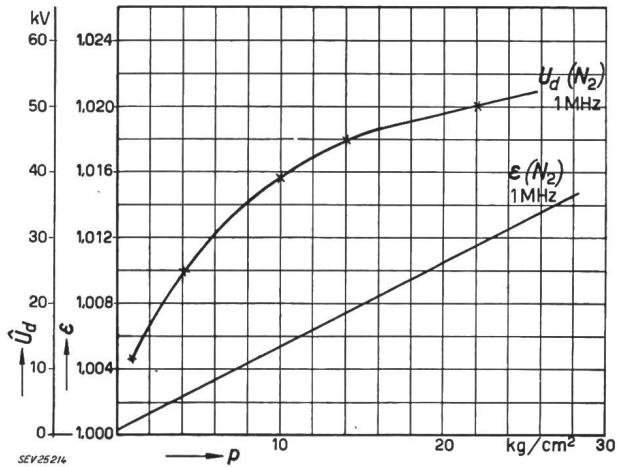


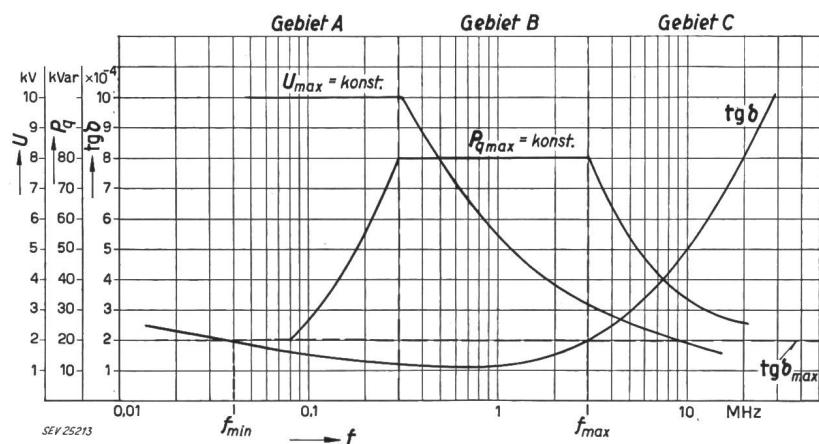
Fig. 14

Durchschlagsspannung U_d und Dielektrizitätskonstante ϵ eines Pressgaskondensators in Funktion des Druckes p bei 1 MHz

eines Pressgaskondensators von 7 mm Plattenbestand und N_2 gefüllt, in Funktion des Gasdruckes dargestellt. Oberhalb 20 kg/cm^2 wird der Vorteil der nur langsam steigenden Durchschlagsspannung 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 $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ Druckerhöhung:

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



Neuerdings werden Pressgaskondensatoren auch mit Schwefel-Hexafluorid SF_6 gefüllt, dessen Dielektrizitätskonstante um 2,3...2,5mal höher ist als jene von N_2 oder CO_2 . Der Schmelzpunkt liegt bei diesem neuen Dielektrikum bei $-50,8^\circ\text{C}$, die kritische Temperatur bei $45,6^\circ\text{C}$ und der kritische Druck bei $38 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Die Durchschlagsspannung in einem homogenen Feld bei 6-mm-Plattenabstand ist bei Verwendung von SF_6 doppelt so hoch als bei N_2 .

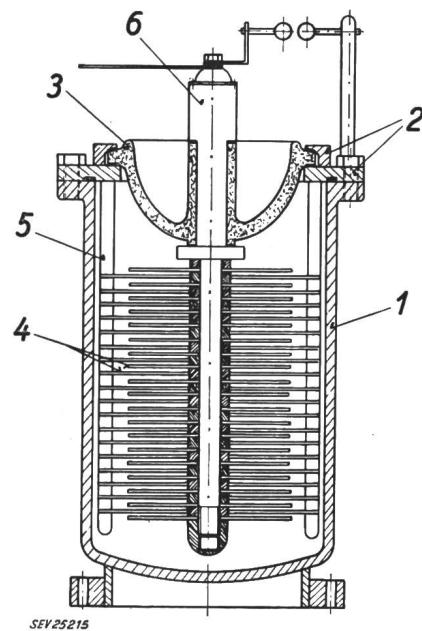


Fig. 15
Schnitt durch einen Pressgaskondensator
1 Kondensatorkübel; 2 Kondensatordeckel; 3 Isolator;
4 Kondensatorplatten; 5 Plattenhalter

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

an den Deckel befestigt. Die Hochspannung wird an das speziell ausgebildete Kopfstück 6 geführt, an welches die Achse mit den spannungsführenden Platten aufgehängt ist. Für variable Kondensatoren sind diese Plattenpaare nur halbkreisförmig ausgebildet, und die Achse ist durch ein Schneckenrad von aussen drehbar. Bei lang anhaltenden, hohen Betriebstemperaturen (z. B. 100°C während einem halben Jahr) kann es beim Drehen der Achse vorkommen, dass die Dichtungsringe um die Achse reissen, und der Druck langsam fällt. Diese Dichtungsringe können jedoch durch Öffnen des Kopfstückes 6 rasch ausgewechselt werden. Ein Manometer gibt den jeweiligen Gasdruck im Innern des Kessels an. Eine Druckverminderung von 50% führt im allgemeinen noch nicht zum Überschlag.

Um das Betriebsverhalten solcher Kondensatoren zu kennen, ist das Studium des Hochfrequenzdurchschlages bei verdichteten Gasen notwendig [7]. Im homogenen elektrischen Feld zeigt es sich, dass der Durchschlag mit HF-Spannung bei Überschreitung einer «kritischen Schlagweite» wesentlich unter dem Wert des 50-Hz- oder Gleichspannungsdurchschlages liegt. Misst man die Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Frequenz bei gleichbleibendem Elektrodenabstand, so zeigt sich ein ähnliches Bild. An die Stelle des «kritischen Plattenabstandes» tritt in diesem Fall die «kritische Frequenz». Dieser Effekt hängt nach verschiedenen Forschern von ionisierenden Stoßprozessen und der Beweglichkeit der Elektronen und Ionen ab. Gänger hat für eine Frequenz von 115 kHz einen kritischen Abstand von $d_k = 4,9$ mm berechnet. Die Beweglichkeitsvorgänge beim Hochfrequenzdurchschlag sind noch nicht restlos abgeklärt.

Bei höheren Drücken benötigt man zur Erzeugung der Stossionisation eine grössere Feldstärke. Im unterkritischen Gebiet wird der Hochfrequenz- und der Gleichspannungsdurchschlag bei den gleichen Bedingungen eintreten; der kritische Abstand wird sich jedoch ändern: Eine Verkleinerung der kritischen Schlagweite wird bei Vergrösserung des Gasdruckes möglich. In Fig. 16 ist die Durchschlagspannung zwischen ebenen Platten in Stickstoff dargestellt. Die ausgezogenen Kurven bedeuten den Scheitelpunkt der Durchschlagspannung in Funktion der Schlagweite d mit dem Druck als Parameter bei einer Frequenz von 90...118 kHz (im Mittel 105 kHz). Zum Vergleich sind die Durchschlagwerte bei Gleichspannungsbeanspruchung mit gestrichelten Linien eingetragen. Bis 2,5 kg/cm² ist die kritische Schlagweite noch gut festzustellen; diese nimmt mit wachsendem Druck ab. Bei höheren Drücken sinken die Werte der Plattenabstände für den Hochfrequenzdurchschlag schon bei kleinen Abständen unter die entsprechenden Werte des Gleichspannungsdurchschlages ab, und die zusammengehörenden Kurven schneiden sich nicht mehr oder höchstens bei ganz kleinen Schlagweiten, die jedoch nicht mehr genau gemessen werden können. Die Verminde rung der Hochfrequenzdurchschlagspannung geht so weit, dass bei 10 kg/cm² die Durchschlagfeldstärke im Hochfrequenzfeld nicht mehr 29 kV/mm, sondern nur noch 20 kV/mm erreicht. Da die Zunahme

der Funkenspannung nicht in gleichem Masse wie der Druck erfolgt, ist das Paschen-Gesetz schon bei kleinen Drucken nicht mehr erfüllt.

In einem Pressgaskondensator ist das elektrische Feld im allgemeinen inhomogen, wodurch die Verhältnisse noch komplizierter werden. Wichtig ist jedoch, dass der Konstrukteur einen Pressgaskondensator für hohe Frequenzen konstruiert und nicht für 50 Hz.

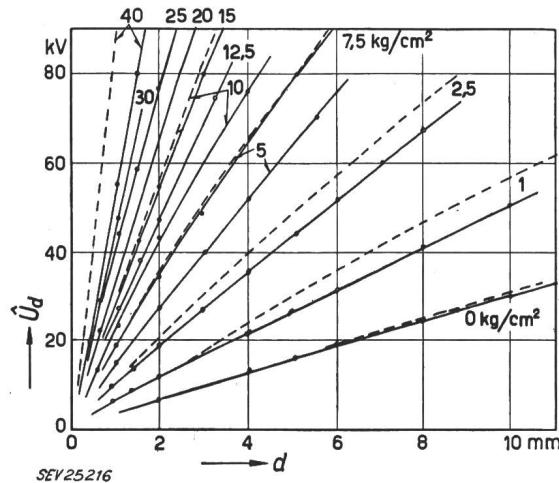


Fig. 16

Durchschlagsspannung zwischen ebenen Platten in Stickstoff U_d in Funktion des Plattenabstandes d bei variablem Druck

— 105 kHz - - - Gleichspannung

Bei der Messung eines Pressgaskondensators von 350 pF und für 12,5 kV HF-Spannung mit N₂-Füllung ergaben sich in Funktion des Druckes und der Temperatur folgende Koeffizienten:

$$\frac{\Delta C}{C} = 4 \cdot 10^{-4} / \text{kg/cm}^2$$

$$\frac{\Delta C}{C} = 3,2 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

Die Verluste im Hochfrequenz-Kondensator bei Hochspannung werden hauptsächlich durch den Skin-Effekt in der Achse und im Kondensatorkopf sowie durch dielektrische Verluste im Durchführungsisolator verursacht. Die Eigenresonanzfrequenz ist je nach Kapazität, gemäss der kleinen Induktivität ungefähr 1...10 MHz.

Die von der Condensateurs Fribourg S. A. hergestellten festen Pressgaskondensatoren sind in Tab. II

Angaben von Pressgaskondensatoren

Tabelle II

Masse		Kapa- zität C_{max}	Leistung P_{qmax}	Strom I_{max}	Effektiv- spannung U_{max}
Durch- messer	Höhe				
mm	mm	pf	kVar	A	kV
380	1200	5000	1500	150	40
380	600	2500	1000	150	40
310	1200	3000	1000	150	40
310	600	1500	700	150	40

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.

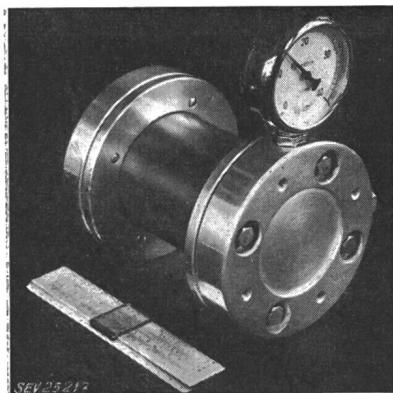
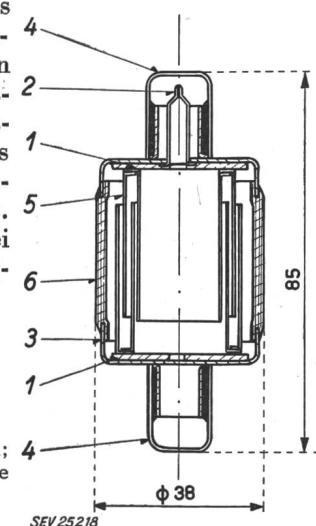


Fig. 17
Pressgaskondensator für 150 kVar, 40 A, 700 pF

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 Schwanungen 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 Überschlag-



lichtbogen selbstlöschend. Äussere Überschläge können bei reduziertem Aussendruck, z. B. in grossen Höhen auftreten; Undichtigkeiten 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.

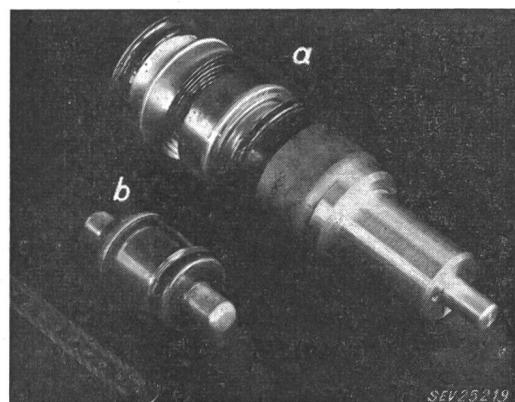


Fig. 19
Variabler a und fester b Vakuum-Kondensator

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: $\operatorname{tg} \delta < 10 \cdot 10^{-4}$</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	
10 000			High K		TB 5000 D 10 000	

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 $\epsilon = 16...18$ und $\epsilon = 80...90$. 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 $\operatorname{tg} \delta$ bei 1 MHz	Leistung kVar	Maximaler Strom A	Temperaturkoeffizient $\times 10^{-6}$	Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ bei 1 MHz	Leistung kVar	Maximaler Strom A
CCA	22	40	$90 + 10$ -50	$< 10^{-3}$	8	6	$-750 + 50$ -150	$< 10^{-3}$	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

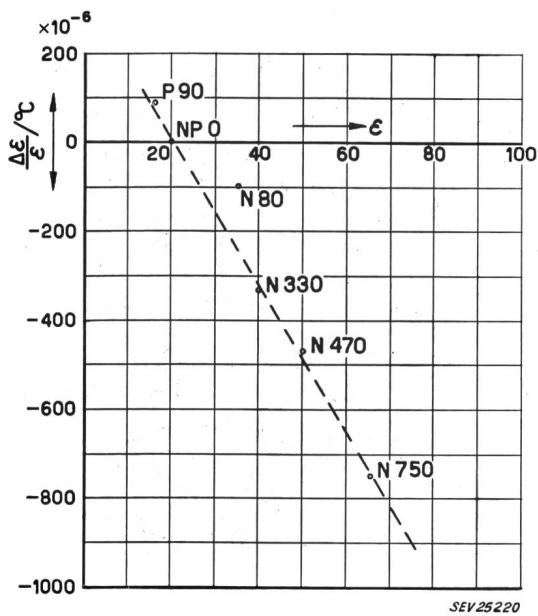


Fig. 20

Änderung des Temperaturkoeffizienten $\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} / ^\circ\text{C}$ 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

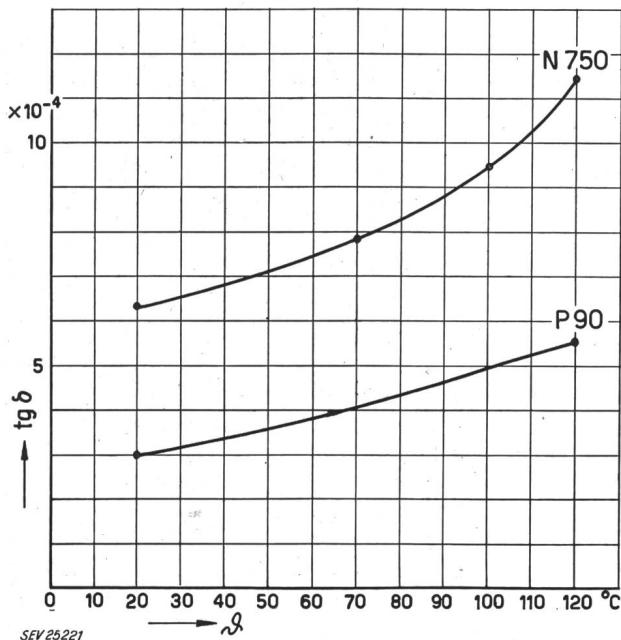


Fig. 21

Aenderung des Verlustfaktors $\tan \delta$ 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-

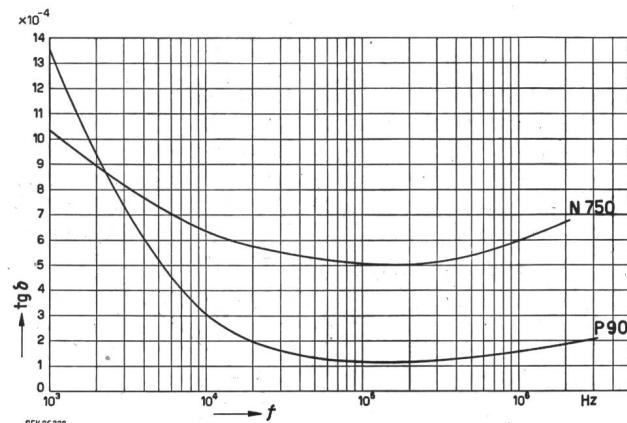


Fig. 22

Fig. 22

**Änderung des Verlustfaktors $\tan \delta$ 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].

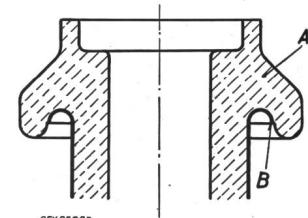


Fig. 23

Ausbildung der Randzone eines Keramik-Topfkondensators

4. Glimmerkondensatoren

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

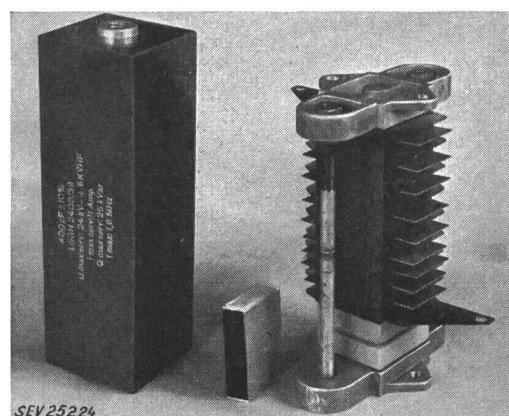


Fig. 24
Glimmerkondensatoren

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 Scheitelpunkt 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 (Glimmertopfkondensator, 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.

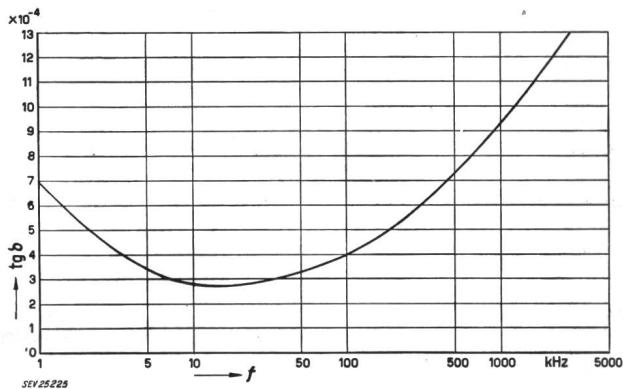


Fig. 25
Änderung des Verlustfaktors $\text{tg } \delta$ in Funktion der Frequenz f eines mit Kunstharz umgossenen Glimmerkondensators
Betriebsdaten: 400 pF, 24 kV Gleichspannung bzw. 6 kV HF-Spannung

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

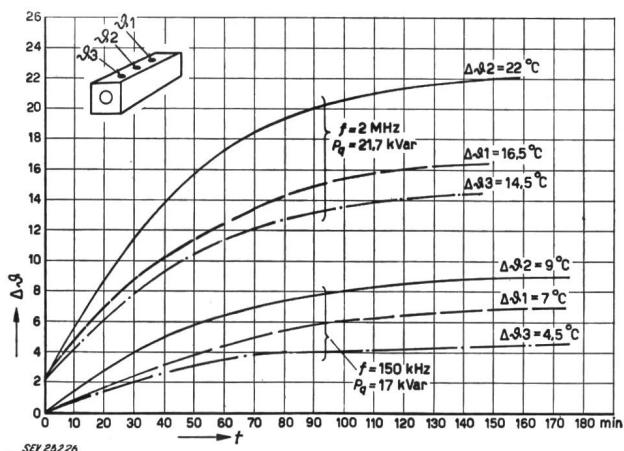


Fig. 26
Erwärmungskurven eines mit Kunstharz umgossenen Glimmerkondensators, gemessen an verschiedenen Orten und bei verschiedenen Frequenzen
Δθ Erwärmung; t Zeit

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 Leistungsverluste 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 $-150 \cdot 10^{-6} / \text{°C}$. 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 induktionsfreie 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.

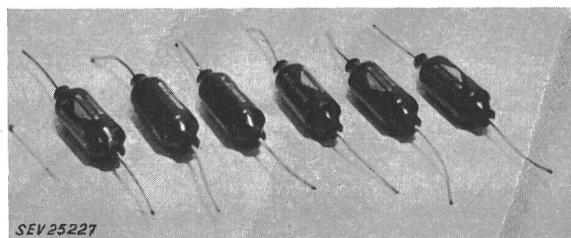


Fig. 27
Polystyrolkondensatoren für HF-Belastung

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 Ausnutzung 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] Mac Leod, 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. Radioélectr. 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 Wassereinlass unter der Füllung und einem Dampfablass oberhalb derselben. Das

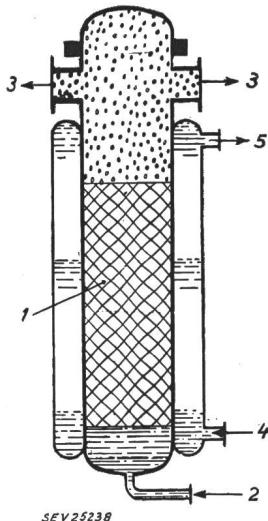
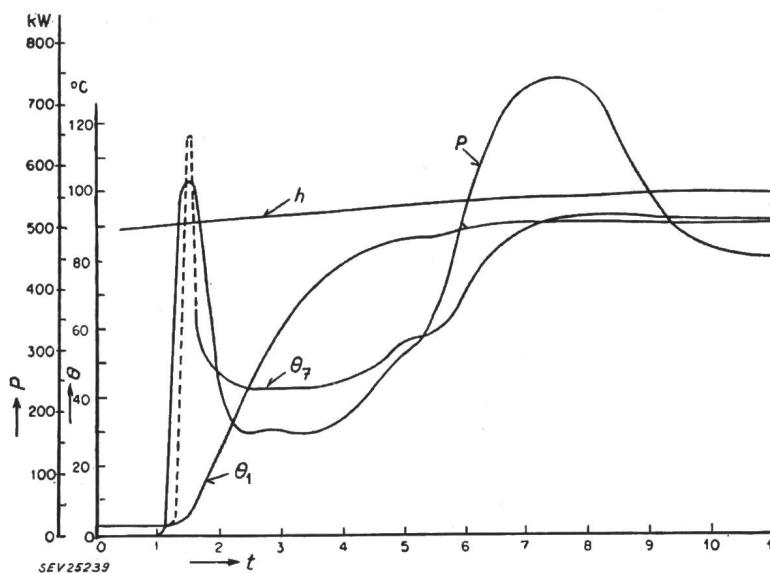


Fig. 1
Automatisch geregelter
Heisswasserreaktor
(in der englischen Abkürzung
oft ABC-Reaktor genannt)
Bei diesem Reaktortyp ist im
Gegensatz zu den üblichen
Heisswasser-Reaktoren die Füllung
nur teilweise im Wasser.
Die Regelung geschieht ohne
Stäbe, nur mit der Fördermenge
der Speisewasserpumpe
(Wasserstand)
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 Speisewasserpumpe. 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 Speisewasserpumpe 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-Reactor wie er oft



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 hineingebracht, dann steigt bei der kritischen Wasserhöhe die Leistung

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

P. Stoll

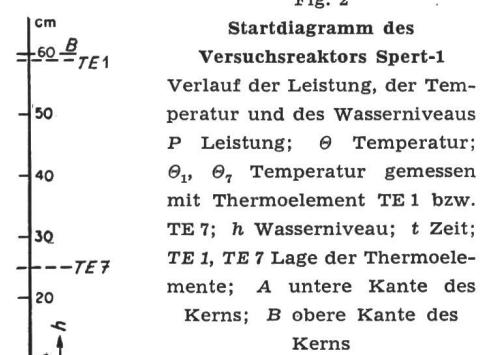


Fig. 2

Startdiagramm des
Versuchsreaktors Spert-1

Verlauf der Leistung, der Temperatur und des Wasserniveaus
P Leistung; θ Temperatur;
θ₁, θ₇ Temperatur gemessen
mit Thermoelement TE 1 bzw.
TE 7; h Wasserniveau; t Zeit;
TE 1, TE 7 Lage der Thermoelemente;
A untere Kante des
Kerns; B obere Kante des
Kerns