

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 43 (1952)  
**Heft:** 18

**Artikel:** Metallpapier-Kondensatoren  
**Autor:** Elsner, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059178>

### **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>**

# BULLETIN

## DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

### Metallpapier-Kondensatoren

Von H. Elsner, Fribourg

621.319.42

Der Autor beschreibt die Geschichte, die Herstellung, den Aufbau, die Eigenschaften und die Prüfung der noch allgemein wenig bekannten Metallpapier-Kondensatoren. Diese werden infolge ihrer «selbstheilenden» Eigenschaft wenn auch nicht überall, doch vielerorts die klassischen Papier-Folien-Kondensatoren ersetzen können.

Historique, fabrication, constitution, propriétés et essais des condensateurs au papier métallisé, dont l'usage n'est pas encore très répandu. Ces condensateurs ont la propriété de supprimer d'eux-mêmes les avaries qu'ils pourraient subir, de sorte qu'ils peuvent remplacer à maints endroits, sinon partout, les condensateurs au papier ordinaires.

#### I. Grundlagen

##### 1. Folien-Kondensator

Der klassische Papierkondensator wird aus Wickeln zusammgebaut, deren Elektroden aus Aluminiumfolien von 5,5  $\mu\text{m}$  Stärke und deren Dielektrikum aus Papierbahnen von 6...15  $\mu\text{m}$  Dicke besteht. Als Anschlusskontakte werden eingelegte Zinn- oder Kupferstreifen verwendet, oder die Aluminiumfolien ragen auf den gegenüberliegenden Stirnseiten vor und werden dort auf verschiedene Art mit Litzen oder Drähten verbunden (Fig. 1). Um die

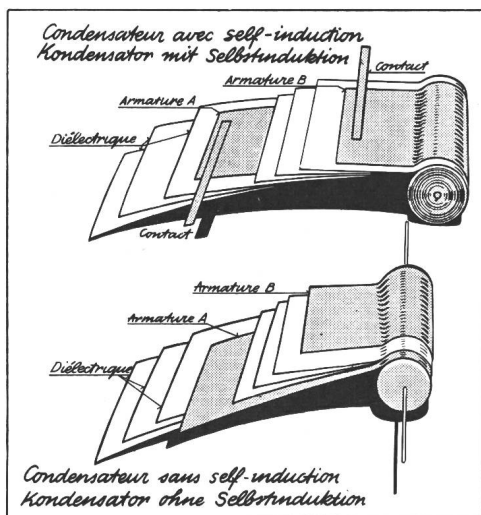


Fig. 1

Wickelarten der Folienkondensatoren

in den dünnen Papierbahnen vorhandenen Poren zu überdecken, müssen mindestens 2 Papiere übereinander gewickelt werden, da damit die Möglichkeit, dass 2 Poren aufeinander zu liegen kommen, sehr gering wird. Für höhere Spannungen werden 3...7 Papierbahnen eingewickelt. Wird nun die Spannung an einem solchen Kondensator gesteigert, so entsteht bei einem je nach Dicke und Anzahl der Papiere verschiedenen Potential ein Durchbruch der Isolation, so dass das Papier infolge des im Durchbruchpunkt fließenden Stromes verkohlt.

Die Aluminiumelektroden können sich als Folge davon berühren oder für die Spannung einen zu kurzen Abstand besitzen, so dass der Kondensator ständig oder bei niedrigster Spannung kurzgeschlossen ist und auch bleibt, d. h. er ist unbrauchbar geworden.

##### 2. Metallpapier-Kondensator

Schon um die Jahrhundertwende versuchte Mansbridge (England) die damals als Elektroden verwendeten Zinn- oder Stanniol-Folien durch eine Metallschicht zu ersetzen. Das Zinn wurde in Pulverform mit einem Bindemittel vermischt und auf das Papier aufgewalzt. Es ergab sich dadurch nicht nur eine Verkleinerung der Dimensionen des Kondensators, sondern man entdeckte, dass das Zinn um den Punkt herum, wo ein Durchschlag durch das Papier entstand, verdampfte und damit die aus diesen metallisierten Folien hergestellten Kondensatoren sich selbst «heilten». Die Leitfähigkeit der Schicht war infolge des verwendeten Bindemittels sehr niedrig, der Isolationswiderstand der Folien sehr klein, so dass diese sog. Mansbridgefolien nicht grosse Verwendung fanden.

Einige Jahre vor dem 2. Weltkrieg wurden in England und in Deutschland die Forschungsarbeiten über Metallpapiere fortgesetzt. Die Metallschicht wurde nicht aufgewalzt, sondern unter Vakuum aufgedampft. Die so behandelten Papierbahnen zeigten die Nachteile der Mansbridgefolien nicht mehr. Ein aus diesen Metallpapieren hergestellter Kondensator hatte Eigenschaften, welche zu weiteren Entwicklungsarbeiten berechtigten; während des 2. Weltkrieges konnten schon in allen modernen Nachrichten-Übermittlungsgeräten und anderen Apparaten Metallpapier-(MP-)Kondensatoren besonders für Gleichspannung in grosser Zahl verwendet werden. Bereits vor, in grossem Masse aber nach dem letzten Krieg, wurden die Forschungen fortgesetzt, um diese Art Kondensatoren auch für Wechselstrom, im besonderen zur Verbesserung des Leistungsfaktors und zum Anlassen von Motoren verwenden zu können. Ihr Aufbau und ihre Eigenschaften sollen deshalb im folgenden näher betrachtet werden.

## II. Metallisierung

### 1. Einrichtung zum Metallisieren

Metalle verdampfen bekanntlich unter Vakuum bei einer niedrigeren Temperatur als ihre Verdampfungstemperatur bei Normalatmosphäre. Dadurch ist es möglich, auf Gegenstände Metallschichten aufzudampfen. Diesen Vorteil benützt man zur Metallisierung der Kondensatorpapiere. Über einem geheizten Gefäss, welches Aluminium oder Zink enthält, wird das von einer Rolle abgespulte Papierband einseitig auf seiner ganzen Breite mit einer Aluminium- oder Zinkschicht von zirka 0,1 mm Dicke überzogen und nachher wieder aufgerollt. Der ganze Vorgang geschieht unter Vakuum. Die Leitfähigkeit der Schicht wird ständig kontrolliert, da sie im besonderen die Qualität des Metallpapiers und des daraus hergestellten Kondensators beeinflusst. Sie richtet sich nach der Durchlaufgeschwindigkeit des Papiers (ca. 100...400 m/min) und der Temperatur des aufzudampfenden Metalls, also der aufgedampften Metallmenge. Im Vakuumgefäss selbst kann auch eine Entmetallisierungseinrichtung zum Herstellen eines Randes oder Musterdruckes und eine Apparatur zum Schneiden der Papierbahnen auf gewünschte Breiten eingebaut werden.

Es ist selbstverständlich, dass das Aufdampfen von Aluminium grössere Schwierigkeiten bereitet als das von Zink, da der Schmelzpunkt vom Aluminium wesentlich höher liegt. Will man Aluminium bei ungefähr gleicher Temperatur wie Zink aufdampfen, muss das Vakuum wesentlich höher sein, wodurch die Anlage komplizierter und teurer wird. Der aus Aluminium hergestellte MP-Kondensator besitzt jedoch den Vorteil, wesentlich höheren Isolationswiderstand aufzuweisen, was besonders beim Anschluss an Gleichspannung von Wichtigkeit sein kann. In England und Amerika werden solche Folien nach dem System der Firma Hunt, England, hergestellt und besonders für Miniaturkondensatoren bis  $0,1 \mu\text{F}$  und Gleichspannungen bis 350 V verwendet. Für grössere Kapazitätswerte, über  $0,1 \mu\text{F}$ , sowie für höhere Gleich- und Wechselspannungen bieten die Zinkfolien infolge der einfacheren Metallisierung grössere Vorteile.

### 2. Lackierung und Entmetallisierung

Würde man die Metallschicht auf das unbehandelte Kondensatorpapier, welches trotz Satinierung eine relativ raue Oberfläche und auch Poren besitzt, aufbringen, so könnte das Metall durch das Papier durchdringen. Die Durchschlagsfestigkeit eines solchen Metallpapiers wäre zu niedrig und der Isolationswiderstand sehr klein. Aus diesem Grunde wird das Papier vor der Metallisierung auf der gleichen Seite, auf welche nachher die Metallschicht aufgedampft wird, mit einer Lackschicht versehen. Mit der einseitigen Lackierung soll erreicht werden, dass das für den Kondensator verwendete Imprägniermittel noch in die Poren des Papiers eindringen kann und das Wasser, welches vor der Austrocknung des Kondensators darin vorhanden ist, dem Papier entzogen werden kann. Durch die Lackierung werden die Poren des Papiers ausgefüllt und die Unebenheiten der Oberfläche ausgeglichen. Um

den Randabstand zur Isolation, d. h. den nötigen Kriechweg zu sichern, kann entweder vor der Aufdampfung die gewünschte, nicht zu metallisierende Fläche mit einem Ölfilm versehen werden oder die Metallschicht wird nach dem Aufdampfen mit Gleich- oder Hochfrequenzstrom wieder abgeschmolzen. Auf die gleiche Art kann auch ein sog. Musterdruck zum beliebigen Aufteilen der Flächen in Segmente, Streifen usw. erfolgen.

## III. Aufbau des Metallpapier-Kondensators

### 1. Selbstheilung

Wird ein metallisiertes Papier mit einer Gegenelektrode und unter Parallelschaltung eines Kondensators  $C$  nach Fig. 2 an Gleichspannung gelegt

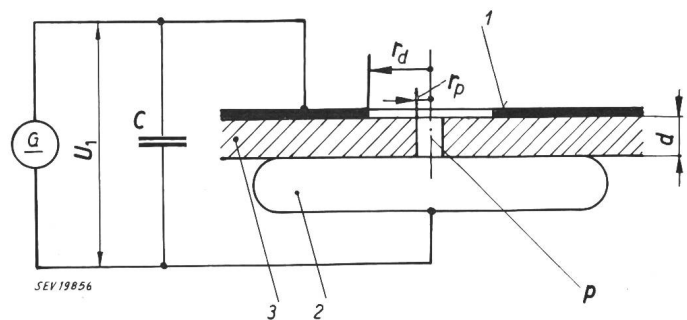


Fig. 2

Prinzipschema einer Anlage zur Untersuchung von Metallpapier

$C$  Kondensator;  $d$  Dicke des Dielektrikums;  $r_d$  Radius des kreisförmig verdampften Metallbelages;  $r_p$  Radius des Durchschlages im Papier;  $p$  Durchschlag; 1 Metallbelag; 2 Gegenelektrode; 3 Papierdielektrikum

und diese Spannung langsam gesteigert, so tritt bei einem bestimmten Potential ein Durchschlag durch das Papier auf. Die Metallschicht verdampft infolge der vom Parallelkondensator gelieferten Energie um den Durchschlagspunkt herum und dies in solcher Masse, dass die Distanz  $r_d - r_p$  genügt, um die Isolation für die Spannung  $U_1$  wieder herzustellen. Die Spannung sinkt im Moment des Durchschlages nach Fig. 3 auf  $U_2$ ; die verbrauchte Energie für den Durchschlag berechnet sich deshalb zu  $C/2 \cdot (U_1 - U_2)^2$ . Der Vorgang des Durchschlages geschieht in einer sehr kurzen Zeit, d. h. in etwa  $10^{-5}$  s, so dass eine Rückwirkung auf die Spannungsquelle nicht möglich ist. Steigert man die Spannung weiter, so erfolgen wieder Durchschläge an anderen Stellen der Papieroberfläche, bis für eine bestimmte hohe Spannung alle jene Stellen des Papiers ausgebrannt sind, deren Isolationswiderstand kleiner ist als es für die angelegte Spannung erforderlich wäre. Je nach Dicke des Papiers kann diese Spannung anders angesetzt werden. Sie wird im weiteren als Formierungsspannung bezeichnet. Wird die Spannung über die Formierungsspannung erhöht, so erfolgen die Durchschläge so häufig, dass die Verwendung des Metallpapiers in diesem Spannungsbereich nicht mehr angezeigt ist.

### 2. Wickeln des Kondensators

Aus diesen Ausführungen und aus der Kurve in Fig. 3 ist ersichtlich, dass zum Bau eines Metallpapier-Kondensators, im Gegensatz zum klassischen

Papier-Kondensator, nur *eine* Papierbahn verwendet werden kann, und zwar nur bis zu einer Spannung, welche nach den Versuchen max. 350 V<sub>~</sub> oder

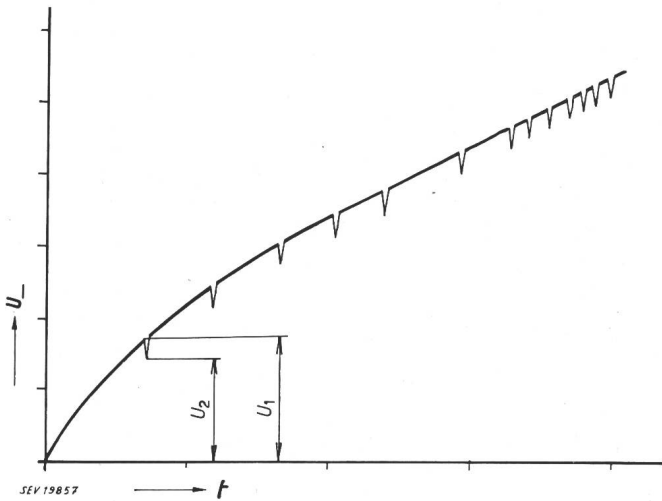


Fig. 3  
Spannungsverlauf beim Durchschlagen von Metallpapier in Abhängigkeit der Spannungshöhe  
U Spannung; t Zeit

150 V<sub>~</sub> beträgt. Die metallisierten Papierbahnen werden nach Fig. 4 übereinandergewickelt und die Stirnseiten mit einer Pistole metallisiert und mit dem Anschlussdraht oder einer Litze verbunden. Es darf selbstverständlich nicht die ganze Stirnfläche metallisiert sein, um der bei der Trocknung

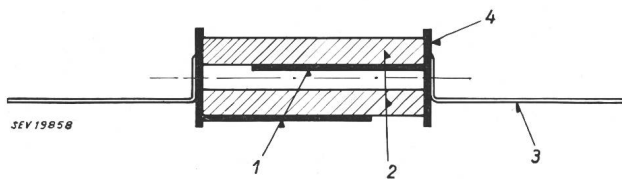


Fig. 4  
Schematischer Schnitt durch einen einlagigen Wickel aus Metallpapier  
1 Metallbelag; 2 Papier; 3 Anschlussdraht; 4 Metallbelag auf Stirnseite

des Wickels austretenden Feuchtigkeit und der in die Wickel eintretenden Imprägniermasse nicht den Weg zu versperren. Es werden deshalb nur Kontaktbrücken nach Fig. 5 aufgebracht.

Eine weitere Möglichkeit, besonders Kondensatoren mit niedrigen Betriebsspannungen und sehr kleinen Kapazitätswerten bis hinunter auf 100 pF herzustellen, hat die Firma Hunt entwickelt. Die mit Aluminium metallisierten Papierfolien werden nach Fig. 6 gemustert und aufgerollt. Die Segmente,

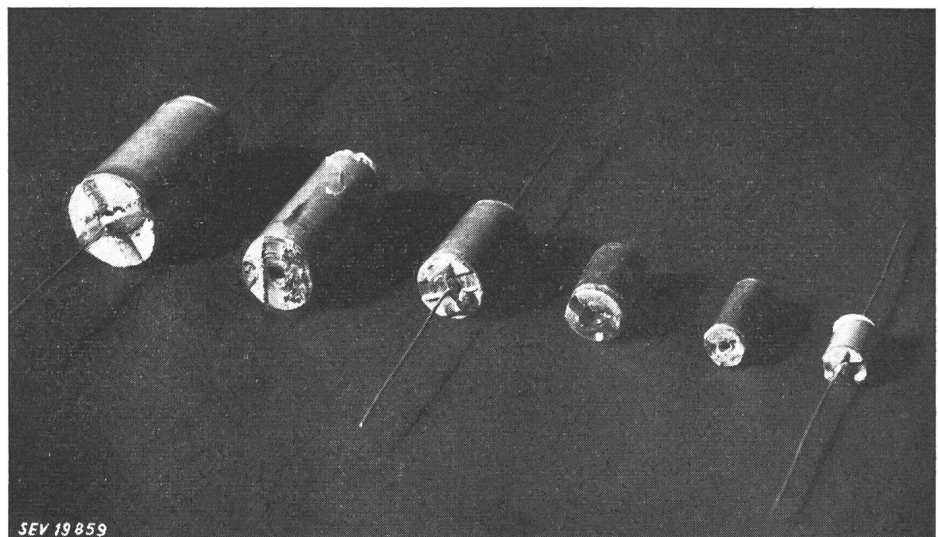


Fig. 5  
Wickel aus Metallpapier mit Teilmetallisierung der Stirnseiten

welche beim Rollen übereinander zu liegen kommen, ergeben je nach der Segmentlänge einen Kondensator. So können mit geringstem Aufwand kleine Kapazitätswerte erreicht werden.

Für höhere Spannungen wird zusätzlich ein nicht metallisiertes Papier mit eingewickelt. Je nach Dicke der Papierlagen können so gewickelte Kondensatoren bis zu einer Spannung von 300 V<sub>~</sub> oder 750 V<sub>~</sub> verwendet werden. Bei dieser Anwendung ist es nicht unbedingt nötig, das zu metallisierende Papier mit einer Lackschicht zu versehen, da die Poren im Papier sich mit grösster Wahrscheinlichkeit überdecken.

In den letzten Jahren ist man von der Verwendung von sog. Press- oder Flachwickeln abgegangen, da infolge der starken mechanischen Beanspruchung des Papiers beim Pressen seine dielektrische Festigkeit vermindert wird und durch das Auftreten vermehrter Durchschläge der Isolationswiderstand ab-, der Verlustwinkel  $\text{tg } \delta$  zunimmt (siehe auch Abschnitt IV).

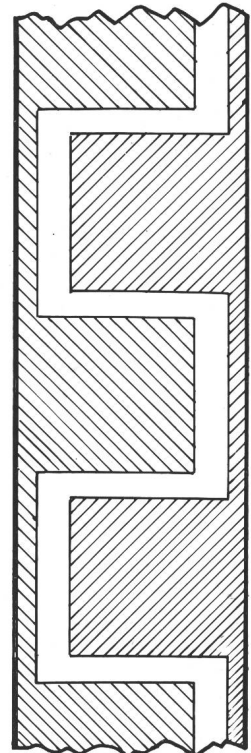


Fig. 6  
Musterdruck von Metallpapier der Firma Hunt

### 3. Leitfähigkeit der Schicht

Beim MP-Kondensator wird die in ihm selbst aufgespeicherte Energie (an Stelle der in der Stoskapazität  $C$  der Fig. 2 aufgespeicherten Energie) zum Ausbrennen und zum «Selbstheilen» des Durchschlages dienen. Die Leitfähigkeit der Metallschicht muss so gewählt werden, dass nur ein Bruchteil der Gesamtenergie  $C/2 \cdot U_n^2$  zur Ausheilung benötigt wird, ansonst die Rückwirkung auf die

Spannungsquelle zu gross wird, sodass die hohe Energie beim Durchschlag sich in mechanische Arbeit umsetzen und den Kondensator zerstören kann. Die Leitfähigkeit der Schicht ist von ihrer Dicke proportional abhängig. Wird sie zu klein, so wird  $r_d - r_p$  in Fig. 2 zu gering, um eine vollständige Isolation zu gewährleisten, und die Ausbrandenergie kann unter Umständen nicht nachfliessen. Wird die Schicht zu dick, die Leitfähigkeit zu hoch, muss auch die Ausbrandenergie sehr hoch sein. Sie wird dann, wie bereits gesagt, zum grössten Teil in mechanische Energie umgesetzt und zerstört den Kondensator.

#### 4. Serieschaltung

Werden Metallpapiere zur Herstellung von Kondensatoren für Betriebsspannungen über 750 V<sub>~</sub> und 300 V<sub>~</sub> verwendet, so schaltet man vorteilhaft mehrere Wickel in Serie. Um eine gute Spannungsteilung bei Gleichstrom zu erhalten, müssen Wickel mit möglichst gleichem Isolationswiderstand in Serie geschaltet werden. Da in der Praxis für höhere Spannungen nur Wickel mit einem Metallpapier und einer zusätzlichen nicht metallisierten Papierlage, also mehrlagige Wickel, verwendet werden, so ist dieses Abgleichen der Isolationswiderstände nicht schwierig, da die Unterschiede zwischen den Wickeln klein sind. Für Wechselstrom hat die Abgleichung nach den Isolationswiderständen nur insofern Bedeutung, dass bei einer Prüfung mit Gleichspannung eine möglichst gleichmässige Spannungsaufteilung auf die einzelnen Wickel von Vorteil ist.

Zur Verbesserung des Leistungsfaktors wird mit Vorteil die Sternschaltung angewendet. Dadurch kann für verkettete Spannungen bis 525 V<sub>~</sub> ein Wickel pro Phase für  $525/\sqrt{3} \approx 300$  V<sub>~</sub> verwendet werden.

Beim Durchschlag eines in Serie geschalteten Wickels werden infolge der hohen Spannung unter Umständen grosse Energien frei. Dem zu begegnen mustert man die Metallfläche auf dem Papier in einer Weise, dass der auf den Durchschlagpunkt zufließende Strom einen schmalen Steg verdampft und damit den «kranken» Teil des Kondensatorwickels abtrennt.

#### 5. Imprägnierung

Bei der Verwendung von Imprägnierungsmitteln muss darauf geachtet werden, dass diese die Metallschicht nicht abbauen, und dass keine Korrosion der Schicht entsteht. Auch darf bei der Ausheilung des Kondensators infolge eines Durchschlages sich keine chemische Veränderung des Imprägnierungsmittels zeigen, welche zu einer Herabsetzung der Ionisationsspannung führen könnte. Da bei sich rasch folgenden Durchschlägen Gase entstehen, so kann der Druck im Innern des Kondensators erheblich ansteigen und zu seiner mechanischen Zerstörung führen. Eine sorgfältige Nachimprägnierung nach der Formierung, d. h. nach dem Ausbrennen der schlechten Stellen und eine vollständige Entgasung, ist daher besonders bei grösseren Kondensatoreinheiten von Vorteil.

## IV. Eigenschaften der Metallpapier-Kondensatoren

### 1. Kapazität

Da sich eine aufgedampfte Metallschicht an das Papierdielektrikum besser anschmiegt als eine aufgewickelte Folie, so ist die Ausnützung des Metallpapiers pro Flächeneinheit mit etwa 20 % besser. Da jedoch für niedrige Betriebsspannungen, wie bereits erwähnt, nur eine Papierlage zwischen 2 Elektroden gewickelt wird, ist der Volumengewinn, bezogen auf den klassischen Folienkondensator mit 2 und mehr Papierlagen, wesentlich. Folienkondensatoren weisen unter sich, bei gleicher Kapazität und Betriebsspannung, aber anderer Fabrikationsart, grosse Volumenunterschiede auf, da einerseits z. B. bei wachs- und bei ölprägnierten Kondensatoren andere Feldstärken im Papier gewählt werden, andererseits weil man bei solchen Kondensatoren Imprägnanten mit höherer Dielektrizitätskonstante verwenden kann (Chlornaphtalenwachs, Chlordiphenyle). Vergleicht man deshalb die Volumina solcher Kondensatoren mit dem MP-Kondensator, ist es wichtig, die Art des Imprägnanten zu berücksichtigen. Fig. 7 und Tabelle I

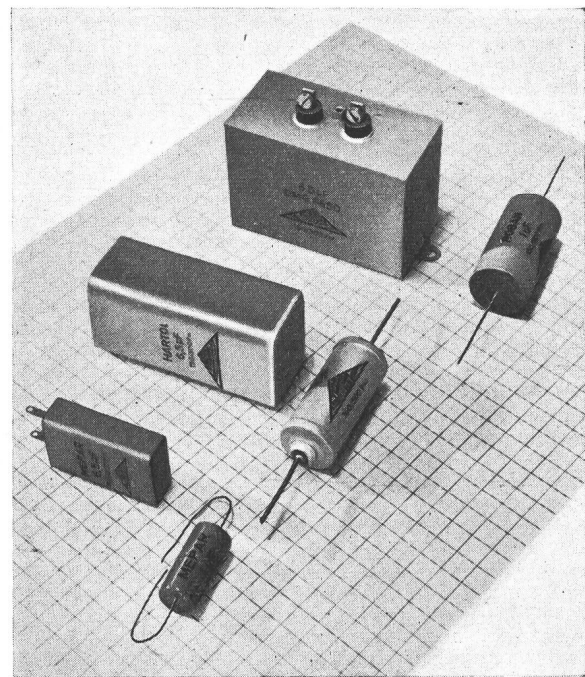


Fig. 7

#### Volumenvergleich von Papierkondensatoren

links: Metallpapierkondensator  
Mitte: Folienkondensator in Öl imprägniert  
rechts: Folienkondensator in Wachs imprägniert

zeigen die Volumenunterschiede, wobei besonders auf die Tatsache aufmerksam gemacht werden soll, dass bei höheren Betriebsspannungen und bei Kondensatoren grosser Leistung teilweise kein Volumenunterschied gegenüber den Öl- oder Chlordiphenyl-Kondensatoren besteht oder dass diese im Volumen sogar erheblich kleiner sind.

Misst man die Kapazität eines MP-Kondensators in Abhängigkeit von der Temperatur, so zeigt sich ungefähr dieselbe Kurvencharakteristik wie beim Folienkondensator. Die Kapazität ändert sich nicht

Volumenvergleich verschiedener Kondensatoren

Tabelle I

Art des Kondensators	Kapazität oder Leistung	Nennspannung	Verhältniszahl der Volumina
MP, rund . . . . Folie, zylindrisch	0,1 µF	150 V—/75 V~	1 5
MP, zylindrisch	2 µF	150 V—/250 V—/350 V—/500 V—/750 V—	1
Block, rechteckig		150 V—	3
		250 V—	2,8
		350 V—	2,5
		500 V—	2,2
		750 V—	1,9
MP, zylindrisch Öl, rechteckig . .	4 µF	220 V~/380 V~/450 V~	1
		220 V~	1,8
		380 V~	1,3
Chlordiphenyl, rechteckig . . .		450 V~	1,1
		220 V~	1,2
		380 V~	0,9
MP, rund . . . . Öl . . . . .	3,5 kVar	220 V~ Δ/380 V~ λ	1
		220 V~	1,3
		380 V~	1
Chlordiphenyl . .		220 V~	0,9
		380 V~	0,83
MP, rechteckig . .	5 kVar	220 V~ Δ/380 V~ λ/525 V~ λ	1
Öl . . . . .		220 V~ Δ	0,6
		380 V~ Δ	0,4
		525 V~ Δ	0,4
Chlordiphenyl . .		220 V~ Δ	0,4
		380 V~ Δ	0,25
MP, rechteckig . .	25 kVar	220 V~ Δ/380 V~ λ	1
Öl . . . . .		220 V~ Δ	0,7
		380 V~ Δ	0,43
Chlordiphenyl . .		220 V~ Δ	0,48
		380 V~ Δ	0,3

*Bemerkung:* Die Volumina wurden nach handelsüblichen Typen berechnet. Diese Typen wurden den Katalogen der Firmen Bosch, Condensateurs Fribourg, Leclanché und Hunt entnommen. Die Werte sind auf- oder abgerundet.

linear und schwankt auch bei mehreren Zyklen nicht mehr als ± 1 %.

Es liegt die Überlegung nahe, dass die Kapazität sich mit der Anzahl der im Kondensator entstehenden Durchschläge vermindern könnte, da ja bei jedem Durchschlag ein kleiner Teil der Metallschicht verdampft. Lange und eingehende Versuche haben jedoch gezeigt, dass diese Änderung bei sorgfältiger Fabrikation und besonders bei richtiger Anpassung der Betriebsspannung an die Eigenschaften des MP-Kondensators sehr gering ist. So hat die Kapazität bei einem Kondensator, bei welchem 5000 Durchschläge erzwungen wurden, nur um 0,3 % abgenommen. Eine solch grosse Zahl Durchschläge sollte im praktischen Betriebe jedoch nur nach vielen Jahren eintreten.

2. Verlustfaktor

Besonders bei Kondensatoren, welche für Wechselspannung verwendet werden, ist der Verlustfaktor von besonderer Bedeutung. Übersteigt dieser einen bestimmten Wert, so kann die im Kondensator durch die Verlustleitung entstehende Erwärmung

unter Umständen von der Oberfläche nicht mehr absorbiert werden. Dadurch kann eine zu grosse Erwärmung des Kondensatorinnern entstehen und durch Wärmedurchschläge zur Zerstörung führen. Bei nach der Formierung entgastem und nach-imprägnierten MP-Kondensatoren grösserer Leistung soll der Verlustfaktor wie beim Folien-Ölkondensator unter 0,5 % liegen. Seine Änderung mit steigender Temperatur zeigt ungefähr dieselbe Charakteristik wie beim Folienkondensator, d. h. sein Minimalwert liegt zwischen 40 und 60 °C.

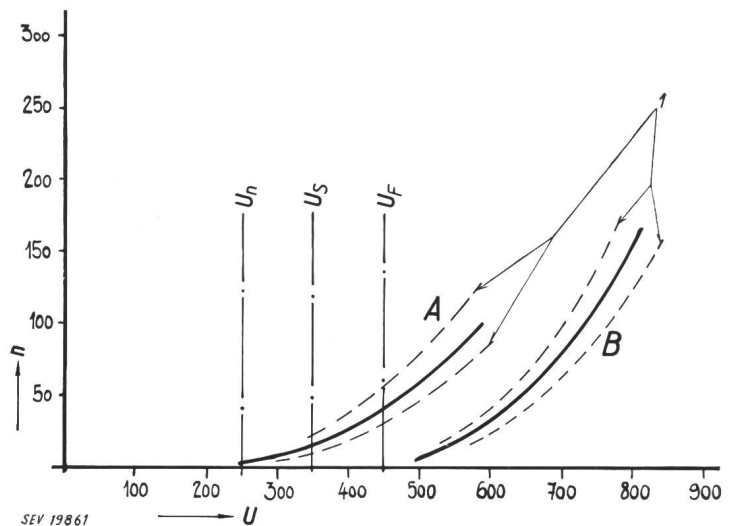


Fig. 8  
Zahl der Durchschläge in Abhängigkeit der an den Kondensator angelegten Gleichspannung  
A 1. Versuch (mit derselben Serie; Kondensatoren des Typs WMH, 1 µF, 250/350 V— und 110/160 V~ (Condensateurs Fribourg)  
B 2. Versuch  
n Zahl der Durchschläge; U Spannung; I Streugebiet

Bei einlagigen MP-Kondensatoren zeigt sich, dass der Verlustfaktor höher und ziemlich starken Schwankungen unterworfen ist. Da solche Kondensatoren jedoch mehrheitlich für Gleichspannungsbetrieb verwendet werden oder die Kondensatoroberfläche im Verhältnis zur entstehenden Verlustleistung gross ist, wird diesem Umstand weniger Bedeutung beigemessen.

Bei mehrlagigen MP-Kondensatoren für Wechselspannung haben besonders die im Betriebe bei Überspannung entstehenden Durchschläge einen langsamen Anstieg des Verlustfaktors zur Folge. Um dies zu vermeiden, muss die zulässige Spitzenspannung des Kondensators so hoch gewählt werden, dass im Betriebe selbst sehr wenig Durchschläge im Kondensator erfolgen.

3. Isolationswiderstand

Der einlagige MP-Kondensator besitzt im allgemeinen einen wesentlich niedrigeren Isolationswiderstand als ein für dieselbe Spannung bemessener Folienkondensator gleicher Kapazität, da dieser mit mindestens 2 Papierbahnen gewickelt wird. Wie bereits erwähnt, wird deshalb das zu metallisierende Papier vor der Behandlung mit einer Lackschicht überzogen. Dadurch kann der Isolationswiderstand in einem Verhältnis von 1:5 verbessert werden. Er streut jedoch in hohem Masse bei MP-Kondensatoren; der minimale Wert der

Isolationsgüte kann für mit Zink metallisierte Papiere mit 200 s ( $\Omega F$ ) garantiert werden. Werte von 1000...5000 s sind jedoch je nach Papierdicke und nach Qualität des Papiers bzw. der Lackschicht nicht selten und für Kondensatoren aus mit Aluminium metallisierten Papieren normal.

Bei mehrlagigen Kondensatoren für höhere Betriebsspannungen sind Isolationsgüten von 1000 bis 5000 s ohne Schwierigkeit erreichbar. Die Streuung innerhalb einer Serie gleicher technischer Daten ist erheblich kleiner und zwar nur etwa 1:2 gegenüber 1:5...1:10 bei einlagigen Typen. Die Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von der Temperatur bewegt sich in denselben Grenzen wie beim Folienkondensator; er sinkt pro  $10^\circ C$  Temperaturanstieg um zirka 50 %.

Misst man den Isolationswiderstand nach den jeweils erfolgten Durchschlägen, so stellt man fest, dass bis zu einer gewissen Anzahl Durchschlägen sein Wert ansteigt, um nachher stetig abzunehmen. Dies rührt vermutlich daher, dass zu Beginn der Formierung jene Stellen ausgeschieden werden, welche eine schlechte Leitfähigkeit aufwiesen. Erst später beginnen andere Stellen, die durch den Durchschlag ausgebrannt sind, bei denen aber vermutlich kleine Rückstände des Metalls noch erhalten bleiben, den Isolationswiderstand zu verkleinern. Zu viele Ausbrände und Durchschläge können deshalb ebenfalls zu einer Verschlechterung der Kondensatorqualität führen.

#### V. Prüfung und Betriebsverhalten des MP-Kondensators

Um eine richtige Prüfmethode für die Spannungssicherheit eines MP-Kondensators zu finden, muss man vor allem seine Fabrikationsmethoden kennen. Wie unter Abschnitt III. 1 aufgeführt wurde, kann die Spannung am MP-Kondensator stetig gesteigert werden, es treten Durchschläge auf, aber der Kondensator zeigt eine Selbstheilung. Fig. 8 zeigt eine Kurve der Anzahl Durchschläge in Abhängigkeit von der angelegten Spannung. In der Fabrikation wird an den Kondensator während einiger Zeit die Spannung  $U_F$  angelegt, die als Formierungsspannung oder Ausbrennspannung bezeichnet wird. Formiert wird so lange, bis kein Durchschlag mehr entsteht. Die Betriebsspannung  $U_n$  ist nun ein Wert, der je nach Erfahrung des Fabrikanten in einem bestimmten Verhältnis unter der Formierungsspannung  $U_F$  liegt. Im praktischen Betriebe kann der MP-Kondensator kurzzeitig bis zu einer Spitzenspannung  $U_S$  belastet werden, bei welcher nur wenig oder keine Durchschläge auftreten sollten. Diese Spitzenspannung wird ebenfalls, je nach Fabrikat, zwischen 130 und 170 % der Betriebsspannung  $U_n$  liegen. Selbstverständlich kann im praktischen Betrieb eine wesentlich höhere Spannung am Kondensator auftreten, sie beeinflusst jedoch sein Betriebsverhalten nicht, da bei jedem kurzzeitigen Durchschlag die Durchbruchstelle «ausgeheilt» wird. Zeigt sich jedoch bei der Bestimmung der Betriebsspannung, dass hohe Spannungsspitzen in grossem Masse auftreten, z. B. bei Zündkondensatoren, deren Betriebsgleichspannung nur 6 oder 12 V beträgt, die Span-

nungsspitze bei jedem Unterbrecherdurchgang jedoch bis 500 V betragen kann, so muss die Ausbrennspannung des MP-Kondensators über diesen Spannungsspitzen, in diesem Fall über 500 V liegen.

Die Prüfung der Spannungsfestigkeit eines MP-Kondensators muss aus den genannten Gründen nicht ein Vielfaches der Betriebsspannung sein wie bei einem Folienkondensator klassischer Bauart, da dieser bei einer Überspannung und dabei erfolgendem Durchschlag unbrauchbar wird. Eine Prüfung der MP-Kondensatoren mit der vom Fabrikanten angegebenen zulässigen Spitzenspannung oder, wenn diese fehlt, mit  $1,5 \times$  Betriebsspannung ist genügend. Dies gilt im besonderen für einlagige Kondensatoren.

Für mehrlagige Kondensatoren für Wechselspannungen von 220 V und mehr sind andere Überlegungen von Wichtigkeit. In der Praxis hat man festgestellt, dass besonders Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors an Netzpunkte angeschlossen werden, an denen Überspannungen bis zum 3fachen Wert der Nennspannung auftreten können. Um zu vermeiden, dass bei solchen Überspannungen auch im MP-Kondensator Durchschläge auftreten und dadurch der Verlustfaktor und die Spannungsfestigkeit sich verschlechtern, ist es angezeigt, mit einer Prüf-Gleichspannung von  $\sqrt{2} \cdot 3 U_n = 4,3 U_n$  zu prüfen. Eine Prüfspannung von  $4,3 U_n$  bedingt einmal mehr, dass die Kondensatoren und besonders ihre Ausbrenn- oder Formierungsspannung den tatsächlich vorkommenden Betriebsverhältnissen angepasst werden, und dass im praktischen Betriebe bei allen vorkommenden Überspannungen möglichst wenig Durchschläge auftreten. Die Folgen einer zu grossen Zahl von Durchschlägen wurden bereits eingehend besprochen.

Die Untersuchung des Einflusses der an den Klemmen der MP-Kondensatoren angelegten Stossspannungen zeigte, dass bei MP-Kondensatoren bei ständig gesteigertem Scheitelwert der Spannung Teildurchschläge erfolgen. Bei sehr hohen Spannungswerten (ca. 12fache Betriebsspannung des Kondensators) wird die Gasentwicklung im Innern des Kondensators so gross, dass der Becher sich deformiert oder undicht wird. Die darauffolgende Kapazitäts- und Verlustfaktormessung zeigt jedoch geringe Veränderungen der Werte, die vor der Stoßspannungsprüfung gemessen wurden.

Im praktischen Betriebe werden kaum Stossspannungen mit solch hohen Scheitelwerten an den Kondensatoren auftreten, da besonders Niederspannungs-Kondensatoren durch Zwischentransformatoren an Freileitungsnetze angeschlossen sind und sich auch infolge der hohen Kapazität selbst gegen zu hohe Stosswellen schützen.

#### VI. Zusammenfassung

MP-Kondensatoren können für Gleichspannung besonders infolge ihres kleineren Volumens mit Vorteil dort eingesetzt werden, wo kleinste Dimensionen für die Apparate verlangt werden. Besonders aber ist ihre Eigenschaft, sich bei Durchschlägen infolge Überspannungen selbst «auszuheilen» auch bei Verwendung von Wechselstrom und zur Verbesserung

des Leistungsfaktors für die Betriebssicherheit von Apparaten und Anlagen von grösster Bedeutung. Es ist bei ihrer Wahl und bei der Fabrikation darauf zu achten, dass im praktischen Betrieb nicht zu viele Durchschläge auftreten, da sonst ihre Spannungsfestigkeit und ihre übrigen elektrischen Eigenschaften mit Ausnahme der Kapazität sich so verändern, dass ihre Betriebssicherheit nicht mehr gewährleistet ist.

#### Literatur

- [1] McLean, D. A.: Metallized Paper for Capacitors. Proc. I.R.E. Bd. 38(1950), Nr. 9, S. 1010...1014.
- [2] Strüb, Hermann: Der Metallpapier-Kondensator. Elektrotechniker Bd. 2(1950), Nr. 10.
- [3] Weeks, J. R.: Metallized Paper Capacitors. Proc. I.R.E. Bd. 38(1950), Nr. 9, S. 1015...1018.
- [4] Metallized Paper Capacitors by A. H. Hunt Ltd. Wirel. Wld. Bd. — (1949), Dezember.
- [5] Strüb, Hermann: Der Metallpapier-Kondensator. Elektrotechn. Z. Bd. 70(1949), Nr. 9, S. 287...293.

Adresse des Autors:

H. Elsner, Condensateurs Fribourg S. A., Fribourg.

## Systematik der elektrischen Ventilapparate

Von Ed. Gerecke, Zürich

621.314

*Es besteht schon lange das Bedürfnis, die sehr mannigfaltigen Ventile der Elektrotechnik systematisch zusammenzufassen. Der Autor, der seit Jahren bestrebt war, eine solche Systematik aufzustellen, hat diese seinen Vorlesungen an der ETH zugrunde gelegt und damit gute Resultate erzielt.*

*Un classement systématique des multiples appareils et dispositifs à effet de soupape utilisés en électrotechnique s'avère de plus en plus nécessaire. L'auteur s'en occupe depuis plusieurs années et fait usage d'un tel classement dans les cours qu'il donne à l'EPF. Ce classement rend de grands services.*

### 1. Einleitung

Im Laufe der Entwicklung haben sich für Generatoren, Motoren und Transformatoren einige wenige Bauformen herausgeschält, und es ist interessant, zu sehen, dass die meisten davon sich für die kleinsten bis zu den grössten Leistungen eignen. Im Gegensatz zu diesen klassischen Maschinen zeigen die Ventilapparate eine enorme Mannigfaltigkeit. Jede Ventilart eignet sich nur für ein bestimmtes Gebiet der Leistung, der Spannung und der Stromstärke. Zudem liegen den verschiedenen elektrischen Ventilen physikalisch ganz verschiedene Prinzipien zu Grunde.

Es besteht nun ein dringliches Bedürfnis nach einer systematischen Einordnung der elektrischen Ventile. Die Ausdrücke, die man verwendet, sind bei näherer Betrachtung oft vieldeutig. So kann man z. B. unter «Gleichrichter» das eigentliche Gleichrichtergefäss verstehen, man kann aber ebensogut ein ganzes Gleichrichter-Unterwerk damit bezeichnen. Andererseits unterscheidet sich das Entladungsgefäss bei einem Wechselrichter nicht von einem gittergesteuerten Gleichrichtergefäss. Die Schwierigkeit, der man heute begegnet, ist historisch bedingt. Ursprünglich waren von der grossen Familie der Ventilapparate nur ein oder zwei Vertreter bekannt. An diesen entwickelten sich dann die Begriffe und die Namen. Mit dem Erscheinen von weiteren Arten von elektrischen Ventilen geschah es dann, dass die ursprünglichen Namen sowohl als Gattungs- als auch als Eigennamen verwendet wurden.

Will man heute eine Systematik aufstellen, so kommt man in Konflikt mit dem bestehenden Sprachgebrauch, an den man sich halten muss. Zudem stellt man fest, dass in dem benachbarten Gebiet der «elektronischen Apparate» einige Ausdrücke gerade das Gegenteil bedeuten. So bezeichnet man in der Technik des Quecksilberdampfgleichrichters mit «Vakuum» den Zustand, bei welchem bei Abwesenheit der Restgase ein Hg-Dampf- oder Edelgasdruck in der Grössenordnung von 1...500 mTorr herrscht, während man in der Technik der Elektronenröhren unter «Vakuum» Drucke in der

Gegend von etwa  $10^{-6}$  Torr versteht, bei welchen die Ionisationsvorgänge keine Rolle mehr spielen. Infolgedessen bedeutet das Wort «Vakuumrohr» das einmal ein Entladungsgefäss mit Höchstvakuum, das andere Mal sowohl dieses als auch ein solches mit Gas- oder Dampffüllung. Andererseits bezeichnet man in der Elektronik als elektronische Geräte sowohl die Höchstvakuumapparate, als auch diejenigen mit Gasfüllung, während in der Gleichrichtertechnik diese als Ionenventile benannt werden.

Eine weitere Schwierigkeit resultiert aus der noch nicht festliegenden Abgrenzung des Begriffs «Elektronik». Die Physiker verstehen darunter alle Erscheinungen, bei denen irgendwie Elektronen im Spiel sind. Dies trifft zu für die Leitung der Elektrizität in Metallen, in Halbleitern oder Isolatoren, in Gasen beliebigen Druckes und im Hochvakuum, bei der Aussendung des Lichtes aus der Elektronenhülle des Atoms, also der Optik, dann in der «Elektronenoptik», ferner bei der Erzeugung von elektromagnetischen Strahlen aller Art, wie beim Zyklotron, Betatron, Linearbeschleuniger usw. Die Elektrotechnik erscheint danach als Teilgebiet der Elektronik. Ein zurzeit in Ingenieurkreisen der Schwachstromtechnik diskutierter Entwurf möchte den Begriff «Elektronik» enger fassen und damit das Gebiet bezeichnen, das die Stromleitung im Hochvakuum, in Gasen von beliebigem Druck und in Halbleitern behandelt. Danach würden der Quecksilberdampfgleichrichter und der bei Überdruck arbeitende Marxgleichrichter zu den elektronischen Apparaten gehören. Die ältere Generation der Elektrotechniker versteht jedoch unter elektronischen Apparaten nur Elektronenröhren mit Höchstvakuum, wie Sende-, Empfangs- und Verstärker- röhren der Nachrichtentechnik, bei welchen also die Ionen keine Rolle spielen. Die Quecksilberdampfgleichrichter kontrastieren dazu in dem Sinne, als zur Erreichung einer geringen Brennspannung die Ionen zur Kompensation der Raumladung wesentlich sind und infolgedessen als Ionengeräte bezeichnet werden. Man ersieht daraus, dass einer Systematik grundsätzliche Schwierigkeiten entgegenstehen.