Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 25 (1934)
Heft: 17

Artikel: Statische Starkstromkondensatoren
Autor: Imhof, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056570

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: 22.08.2025

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

sogenannte Realkristalle, d. h. sie sind schon in kleine Blöcke aufgespalten, die sehr wenig (ca. 2′) aus der idealen Lage verdreht sind. Diese sogenannte Mosaikstruktur und die Wechselwirkungen der einzelnen Blöcke müssen daher noch weitgehend untersucht werden, um zu einer Klärung aller Fragen der Festigkeit zu gelangen. Ansätze in dieser Richtung liegen von verschiedenen Seiten vor, haben aber noch keine definitive Abklärung gebracht.

Statische Starkstromkondensatoren.

Von *A. Imhof*, Zürich-Altstetten.

621.319.4

Innert weniger Jahre sind die Starkstromkondensatoren zu einem technisch hochentwickelten Apparat geworden, der ausserordentlich rasch Eingang in die Verbraucheranlagen elektrischer Energie gefunden hat. Während über die Verwendung der Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors schon viel geschrieben wurde, weiss die Literatur über die Kondensatoren an sich noch verhältnismässig wenig zu berichten. Der Grund liegt zweifelsohne in der Neuheit der Kondensatorentechnik, die, um nicht die Konkurrenz zu belehren, über oberflächliche Darstellungen nicht hinausgehen durfte. Auch die hier folgenden Darstellungen müssen sich noch eine gewisse Beschränkung auferlegen, dürften aber da und dort über das bisher publizierte hinausgehen.

En quelques années les condensateurs à courant fort se sont développés au point à former maintenant des appareils perfectionnés dont l'utilisation dans les installations des consommateurs d'énergie électrique a pris un essor insoupçonné. Tandis que la littérature technique foisonne d'articles sur l'utilisation des condensateurs pour l'amélioration du facteur de puissance, on ne trouve que relativement peu d'indications sur les condensateurs eux-mêmes. Cette lacune est sans doute due à ce que la technique du condensateur est toute récente et que les fabricants, pour ne pas livrer leurs secrets à la concurrence, s'en sont tenus à quelques descriptions superficielles. Quoique l'auteur ait encore dû s'imposer quelques restrictions, les lignes qui suivent dépassent cependant en quelques points ce qui a été publié jusqu'à présent.

Dielektrika.

Das aktive Dielektrikum spielt bei keinem Apparat die so ausschlaggebende Rolle wie beim Kondensator; von dessen Qualität und Dimensionierung hängt die Güte des Kondensators in erster Linie ab. Kein Gebiet der Starkstromtechnik stellt so hohe Anforderungen an ein Isoliermaterial wie der Kondensatorbau, müssen doch in grösseren Kondensatoren viele Quadratkilometer einer Isolierschicht von wenigen hundertstel Millimeter Dicke fehlerlos sein, ja weiterhin ununterbrochen eine sehr hohe elektrische Festigkeit aufweisen.

Während bei Kondensatoren kleiner Kapazität als Dielektrikum verschiedene Isolierstoffe, so namentlich Glimmer, Glas, Porzellan, Hartpapier, Oel, Luft angewandt werden, kommen für Kondensatoren grosser Kapazität (mit Ausnahme der Elektrolytkondensatoren) nur Stoffe in Betracht, die in Folien erhältlich sind, vor allem imprägnierte Papiere. In einer früheren Entwicklungsstufe spielten auch Filme auf der Basis der Acetylcellulose eine Rolle, die sich leicht durch chemische Prozesse versilbern lassen und so mit dicht anhaftenden Elektroden versehen werden können. Auch lassen sich Papiere mit Azetylcellulose imprägnieren und in gleicher oder ähnlicher Weise metallisieren wie die Filme selber. Für den Gebrauch in Luft sind solche Filme jedoch zu hygroskopisch. Die Paraffinierung verzögert nur das Eindringen von Feuchtigkeit, sie vermag es nicht zu verhindern. Ein Nachteil ist auch die starke Abnahme der elektrischen Festigkeit mit steigender Temperatur.

Papier ist an sich für Kondensatoren kein Isolator genügender Durchschlagsfestigkeit; zudem ist es sehr hygroskopisch. Indes war vom Kabelbau her bekannt, dass Papiere, wenn sie mit geeigneten Imprägniermassen oder Oel imprägniert werden, ausgezeichnete Dielektrika ergeben. Fig. 1 zeigt mit Gleichspannung und 50periodiger Wechselspannung gemessene Minuten-Durchschlagsfestigkeiten an imprägnierten Feinpapieren in Funktion der Dicke. Je feiner die einzelnen Papiere sind, desto näher gehen die Kurven durch den Nullpunkt des Koordinatensystems. Die Werte gelten für Papiere, die von Feuchtigkeit vollständig befreit und mit Mineralöl imprägniert sind; sie sind zwischen Kugeln und alternativ zwischen aufgelegten Metallfolien gemessen, Messdauer 1 min. Fig. 2 (Kurve 1) zeigt, wie sehr die Festigkeit für sehr kurze Beanspruchungsdauer ansteigt und welchen Grenzwert

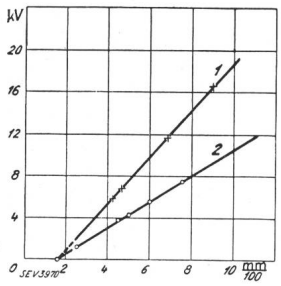


Fig. 1.
An fertigen Wickelelementen gemessene Durchschlagsfestigkeiten imprägnierter Feinpapiere in Funktion der Dicke.
1. mit Gleichspannung,
2. mit 50periodiger Wechselspannung.

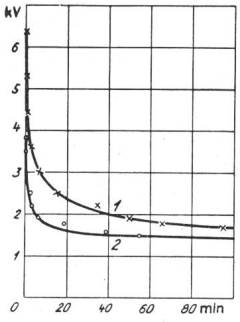


Fig. 2.
Durchschlagspannung (1) und Gasspannung (2) in Funktion der Belastungszeit.

sie bei langer Dauer annimmt — bei neuem Dielektrikum! Kurve 2 darf indes nicht überschritten werden; sie stellt die «Gasspannung» in Funktion der Zeit dar, d. h. diejenige Spannung, bei welcher Gas aus den Wickeln entweicht [1]). Diese kann auch

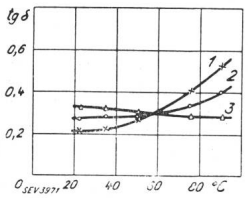
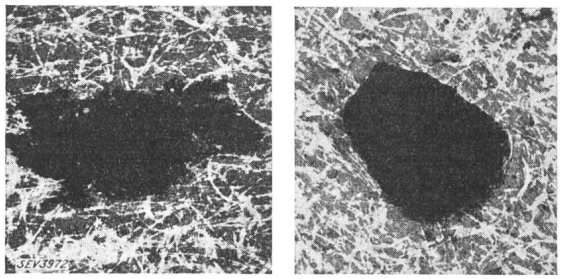


Fig. 3.
Dielektrische Verluste in Funktion der Temperatur für einige Papiere bis 50 Per./s.
1. Für ein Hadernpapier,
2. für 50 % Hadern- und 50 % Cellulosepapier,
3. für ein Cellulosepapier.

[1]) Siehe Bull. SEV 1933, Nr. 20, S. 491.

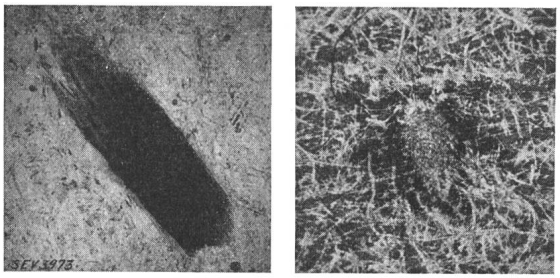
tiefer liegen; sie hängt unter anderem vom Trocknungs- und Imprägnierprozess und vom Alter der Anordnung ab.

Von den Untersuchungen der Kabeltechnik ist bekannt, dass die elektrische Festigkeit der dichten Papiere grösser ist als diejenige der lockeren Papiere. Im Kondensatorbau muss dieses Ergebnis kritisch gehandhabt werden, denn als neues Moment



a *b*

Sog. Schäben, d. h. braune, nicht zerkleinerte und nicht aufgeschlossene Teilchen des Rohstoffes.



c *d*

Schäbe, die noch Faserstruktur aufweist. Faserknoten aus nicht gleichmässig verteilten Fasern.

Fig. 4.
Einige in Kondensatorpapier vorkommende Fehler in 15facher Vergrösserung.
Mikrobilder *a*, *b* und *d* von Trocken-Präparaten, *c* von benetztem Präparat.

kommen hier, infolge der sehr dünnen Gesamt-Isolierschicht (im allgemeinen Schichtdicken von $^{20}/_{1000}$ bis $^{100}/_{1000}$ mm) die Art und Häufigkeit der Fehlerstellen mehr zur Auswirkung als bei dicken Schichten.

Die heutigen kompendiösen Kondensatoren wurden nur möglich durch die sehr niedrigen dielektrischen Verluste der in richtiger Weise ölimprägnierten Papiere. Man erreicht mit Hadernpapieren etwa Werte von tg δ = 0,0018 bis 0,0025, mit Zellulosepapieren tg δ = 0,0030 bis 0,0045. Die Temperaturfunktion der Verluste ist für zwei verschiedene Papiere in Fig. 3 wiedergegeben. Die mittlere Kurve wurde für die Kombination beider Papiere zu je 50 % erhalten.

Misst man an Kondensatorpapieren die Zahl der leitenden Stellen pro Quadratmeter, so liegen diese zwischen etwa 10 und einigen Hundert, je nach Papierdicke und Fabrikat, unter Voraussetzung von Papieren zwischen $^{8}/_{1000}$ und $^{15}/_{1000}$ mm.

Die Dielektrizitätskonstante des fertigen Dielektrikums beträgt etwa 3,6 bis 4,2.

An Kondensatoren, deren Papierdielektrikum mit dickflüssigem «Kabelöl» imprägniert war, haben wir gemessen: tg δ = 8 bis 26 ‰.

An Papierkondensatoren, die mit «Kompoundmassen» imprägniert sind, werden ähnlich hohe Durchschlagsfestigkeiten gemessen wie an ölimprägnierten; die dielektrischen Verluste sind höher und variieren natürlich je nach Imprägniermittel. Z. B. wurde bei Hadernpapier und einer sogenannten unbrennbaren Masse (chlorierte Kohlenwasserstoffe), wie sie unter den Namen «Waxite, Nibrenwachs» u. a. im Handel sind, gemessen: tg δ = 0,03 bis 0,045. Die Temperaturfunktion der Verluste ist im allgemeinen ungünstiger als mit Oel.

Wir besitzen heute bereits einige Kenntnisse über die Alterung des Kondensatoren-Dielektrikums [2]). Um keine Beunruhigung heraufzubeschwören, sei zum vornherein erwähnt, dass die Sicherheit neuer Kondensatoren sehr hoch gewählt wird, damit sie auch nach starker Alterung noch genügt. Gleichzeitig betonen wir aber, dass es gerade die Alterungserscheinungen sind, welche vor zu weitgehender Verbilligung warnen sollen, und dass sich der Brauch, bei der Anschaffung von Kondensatoren in erster Linie den Preis ausschlaggebend sein zu lassen, leicht durch ein kurzes Leben der Apparate rächen kann. Wir haben durch zahlreiche Messungen an Kondensatoren verschiedener Herkunft konstatiert, dass die Durchschlagsfestigkeit der ölimprägnierten Papiere innert einiger Jahre um etwa 40 % abnimmt. Dies gilt nicht

a) Expansionsgefäss. Ein Vorschlag verwendet 2 kommunizierende Expansionsgefässe mit einer Sperrflüssigkeit zwischen den beiden.

b) Oelumlauf durch Entgaser.

c) Kessel ganz mit Oel gefüllt, elastisch nachgebende Wandungen.

d) Kessel ganz mit Oel gefüllt, elastisch nachgiebige Körper eingelegt.

e) und *f)* Ausdehnungskolben mit Rückstellfedern. Kessel ganz mit Oel gefüllt.

g) Nachgiebiger Deckel, geschützt durch starren Deckel. Kessel ganz mit Oel gefüllt.

h) Expansionsgefäss mit nahezu gegen die Luft abschliessendem Schwimmer.

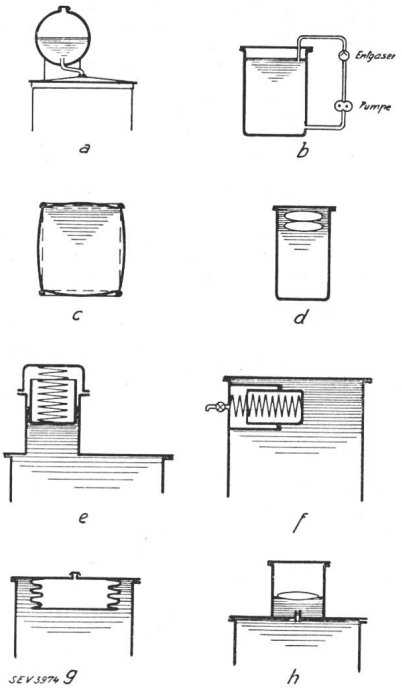


Fig. 5.
Verschiedene Vorschläge, um das Oel der Kondensatoren gasfrei zu halten.

nur für Zellulose-, sondern auch für Hadernpapiere. Diesbezüglich sei wiederum auf die unter [1]) zitierte Arbeit verwiesen. Viel stärker kann aber

[2]) Bull. SEV 1933, Nr. 20, S. 487.

die «Gasspannung» abnehmen; oft gehen wohl Kondensatoren aus diesem zweiten Grunde schliesslich defekt. Ist das Dielektrikum ständig beansprucht, so scheint die Verschlechterung geringer zu sein. Die dielektrischen Verluste nehmen erst wesentlich zu, wenn die x-Wachsbildung begonnen hat. Die Verkleinerung der Gasspannung ist wohl darauf zurückzuführen, dass allmählich Luft aufgenommen wird.

Eine Reihe von Vorschlägen beschäftigen sich damit, das Oel dauernd gasfrei zu erhalten. Dazu ist restlose Füllung mit Oel und ein völlig hermetischer Abschluss nötig. Durch besondere Vorrichtungen, wie Ausdehnungsgefässe, elastisch nachgiebige Wandungen usw. soll der Ausdehnung des warmen Oeles Rechnung getragen werden. In Fig. 5 sind einige solche Möglichkeiten angegeben. Die Praxis hat zwar bis heute von diesen Mitteln erst tastend Gebrauch gemacht. Die erwähnte Alterung wurde auch an hermetisch geschlossenen Kondensatoren mit Luftschicht über dem Oel konstatiert.

Die Wickelelemente.

Die technischen Phasenschieberkondensatoren bestehen im wesentlichen aus aufgewickelten Blattkondensatoren. Gebräuchlich sind Rundwickel

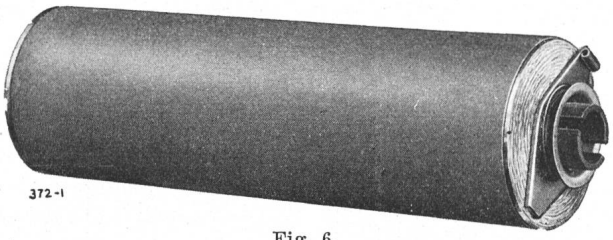


Fig. 6.
Rundwickel.

(Fig. 6) und Flachwickel (Fig. 7 bis 9). In der Schweiz sind fast ausschliesslich die homogeneren Rundwickel üblich. Papier und Folie sind auf einen runden Dorn gewickelt. Bei Flachwickeln ist der Dornquerschnitt wesentlich rechteckig, mit halbkreisförmigen Ausbiegungen der kurzen Seite;

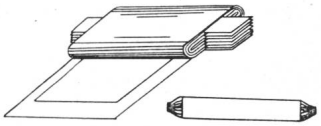


Fig. 7.
Flachwickel mit beidseitig vorstehenden Ableitungen.

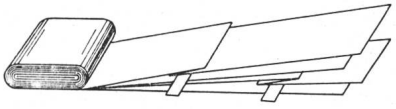


Fig. 8.
Flachwickel mit verstärkter Isolation über den Ableitungen.

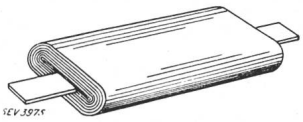


Fig. 9.
Flachwickel, dessen Träger zur Ableitung dient.

er kann sich bis auf ein blosses Preßspanblatt reduzieren. Die beiden Kondensatorbeläge können axial gegeneinander versetzt sein oder sie stehen einander wie Spiegelbilder gegenüber. Die erste Anordnung wird namentlich dann gewählt, wenn der Stromanschluss an den vorstehenden Belägen erfolgen soll, wie dies z. B. bei den Kondensatoren der Micafil A.-G. der Fall ist (Fig. 6). Viel verbreitet ist auch der Stromanschluss durch axial eingelegte Ableitbleche (Fig. 7 und 8). Indes werden die Verluste hiedurch vergrössert, weil der Strom teilweise die Windungen der Folien durchfliessen muss.

Die kapazitive Leistung der üblichen Wickel beträgt, je nach System, etwa 0,2 bis 1,2 kVAr bei Spannungen von etwa 500 V und mehr, bei 220 V etwa die Hälfte.

Bei hohen Spannungen wendet die Micafil A.-G. an den Frontseiten der Wickel Strahlungsschutzhauben an (Fig. 14).

Eine Reihe von Vorschlägen befasste sich mit der Herstellung von sogenannten Widerstandsrändern an Kondensatoren, um die an den Elektrodenrändern grossen Feldstärken herunterzusetzen. Der Widerstandsrand soll eine Randlinie vermeiden. Der Widerstand muss allerdings ausserordentlich hoch sein, damit die zusätzlichen Verluste in ihm nicht nachteilig wirken. Die gute praktische Verwirklichung ist bis heute nicht gelungen.

Der Aufbau.

Ein zweckmässiger Aufbau des Kondensators aus den Einzelelementen ist sowohl für dessen Qualität, als auch für dessen Preis von grosser Bedeutung. Man kann unterscheiden zwischen *Paketaufbau* und *lockerem Aufbau* einerseits, ferner zwischen der Anordnung mit vertikalen, horizontalen und schiefliegenden Wickelelementen anderseits.

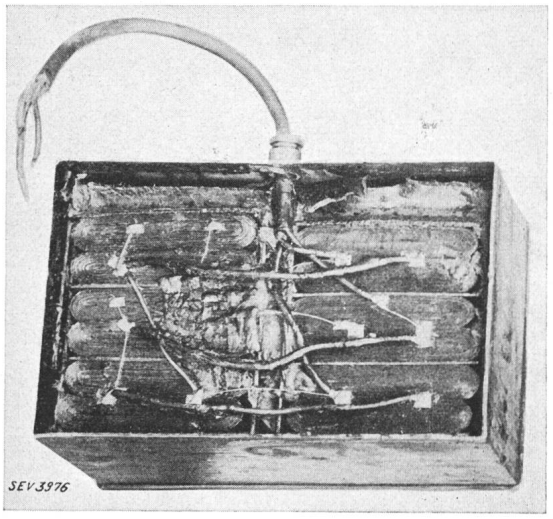


Fig. 10.
Kleiner Kondensator mit Flachwickeln in Masse.

Zu erwähnen ist endlich noch der Aufbau aus *einzeln umkapselten Wickeln* und der Aufbau mit *koaxialen Wickeln.*

Der *Paketaufbau* kann nur bei *Flachwickeln* angewandt werden. Für ihn ist charakteristisch, dass die einzelnen flachen Elemente mit ihren Breitseiten direkt aufeinandergelegt und zu Paketen zu-

sammengepresst werden. Diese Bauweise ist namentlich in Deutschland verbreitet (Fig. 10 und 11).

In der Schweiz wird fast allgemein der *lockere Aufbau* angewandt, charakterisiert durch in gegenseitigen Abständen gelagerte Elemente. Während bei kleinen Kondensatoren die vertikale Anordnung der Elemente häufig ist (Fig. 12), bevorzugt man bei Grosskondensatoren aus mechanischen Gründen im allgemeinen die horizontale oder schiefe Elementenlagerung. Beide Anordnungen haben den Vorteil, dass die Tragkonstruktionen wesentlich nur auf Zug beansprucht sind, nicht auf Biegung, und daher mit weniger inaktivem Konstruktionsmaterial auszukommen ist. Temperaturmessungen im Innern der Elemente haben bewiesen, dass die schiefe Anordnung der Wickelachsen, wenn der Wickeldorn dem Oel den Zutritt gestattet, für die Abkühlung günstig wirkt. Ein weiterer Vorteil wird bei Hochspannungskondensatoren gewonnen: Sind Elemente in Serie geschaltet, so besteht zwischen deren einem Ende die doppelte Elementenspannung; bei schiefer Anordnung der Elemente ist, je nach Neigungswinkel, der Abstand der Enden sehr viel grösser als bei horizontaler Anordnung. Der lockere Aufbau zeichnet sich gegenüber allen anderen Systemen durch Uebersichtlichkeit, leichte Kontrollierbarkeit und Auswechselbarkeit beschädigter Teile und durch gute Lokalisierung von Störungen aus. Eine besonders einfache und für alle Spannungen gleiche Aufbauart ist in Fig. 13 und 14 ersichtlich. Bei Niederspannung sind die Rollen parallel, bei Hochspannung zunächst in Serie und die Seriegruppen wieder parallel geschaltet. Jeder «Rahmen» kann leicht einzeln aus dem Tragrost herausgenommen werden, jede Rolle für sich aus dem Rahmen. Nach Abhebung des Deckels lässt sich der ganze aktive Teil durch Heben des Tragrostes aus dem Oel ziehen; bei sehr grossen Kondensatoren werden zwei bis drei getrennte Tragroste vorgesehen.

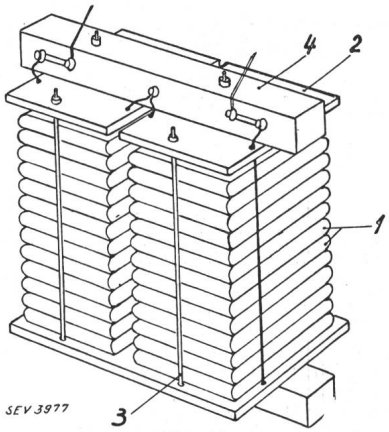


Fig. 11.
Innenausbau eines Kondensators mit übereinander geschichteten Flachwinkeln.

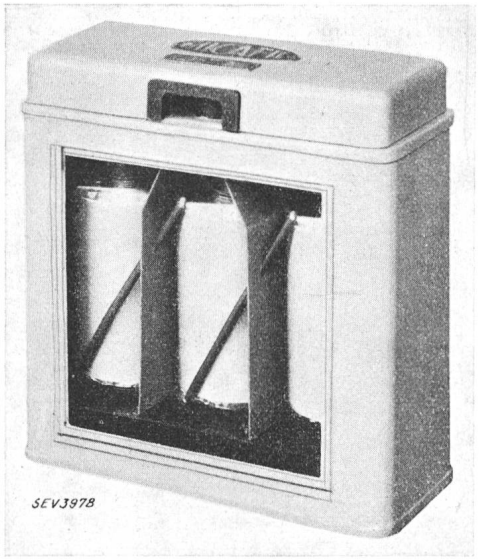


Fig. 12.
Kleinkondensatoren mit vertikal stehenden Rundwickeln.

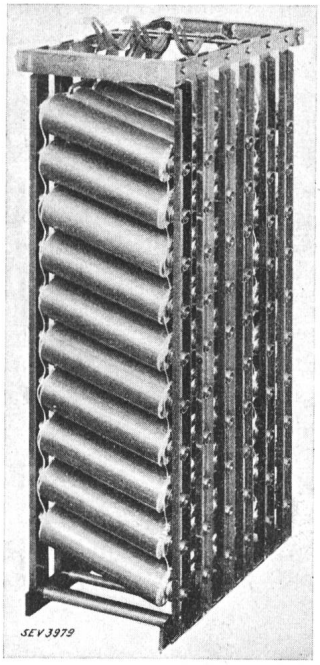


Fig. 13.
Inneres eines Kondensators mit schiefliegenden zylindrischen Wickeln.

Ein System verwendet einzeln metallisch umkapselte Rundelemente. Diese Konstruktion ist aber unnötig kompliziert durch die Unzahl der Klemmen und dicht zu haltenden Lötstellen.

Ein weiteres System verwendet axial übereinander liegende Rundwickel in röhrenförmigen Gefässen. Bei Dreiphasenkondensatoren sind die drei hohlzylindrischen Wickelelemente koaxial übereinander gewickelt (Fig. 15).

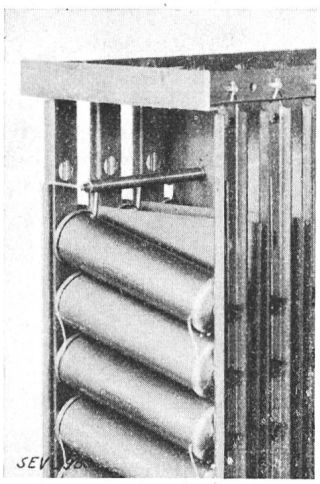


Fig. 14.
Inneres eines Hochspannungs-Kondensators mit Strahlungsschutzhauben.

Kleine Kondensatoren werden im allgemeinen hermetisch abgeschlossen. Grosse Kondensatoren werden entweder gut verschlossen — ein «hermetischer Abschluss» ist nicht ohne unnötige Verteuerung möglich — oder nach dem Vorbild der Transformatoren mit Entlüftungsorganen versehen, die für Trockenhaltung der Luft sorgen (Fig. 16). Grosse Freiluftkondensatoren werden im allgemeinen wieder nach dem Vorbild der Transformatoren mit einem Expansionsgefäss ausgerüstet (Fig. 17). In manchen Fällen werden Transportrollen angebracht.

Ueber die Gewichte der Kondensatoren orientiert das Diagramm Fig. 18.

Prüfung der Kondensatoren.

Die Prüftechnik spielt bei den Kondensatoren insofern eine besonders vortretende Rolle, als kleinste Materialfehler, die bei anderen Apparaten in ihrer Wirkung verschwinden können, hier ihren Einfluss ausüben. Denn zwischen den beiden

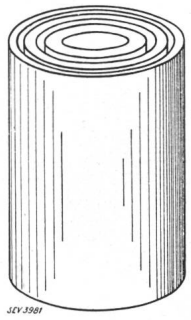


Fig. 15.
Dreiphasiges Rundwickel-Element mit 3 koaxialen einphasigen Wickeln.

Gegenpolen liegen grosse Flächen des Isoliermaterials in dünnsten Schichten. Man ist daher voll und ganz auf die Zuverlässigkeit dieser Schichten angewiesen.

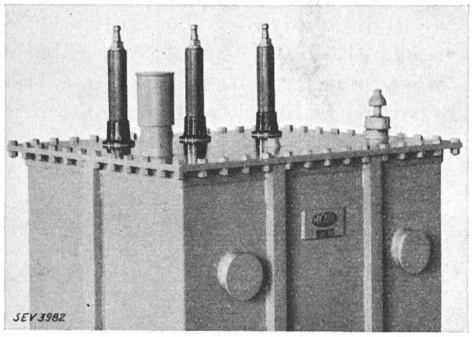


Fig. 16.
Hochspannungs-Kondensator mit Entlüftungsorganen.

Die Prüftechnik betrifft deshalb in erster Linie die Dielektrikumsschichten. Das Papier wird vor der Verarbeitung auf Einhaltung der Dicke, Zahl der leitenden Stellen pro Flächeneinheit, Dielektrizitätskonstante, Saugfähigkeit, Reisslänge, Falzverlust usw. geprüft. Die gewickelten Kondensatoren erfahren bei den einen Fabrikanten schon vor der Imprägnierung eine Prüfung auf genügende Durchschlagssicherheit, bei anderen erst nach der Imprägnierung. Diese Prüfung ist zum Teil mit Gleichspannung üblich, zum Teil mit Wechselspannung. Wird mit Gleichspannung geprüft, so wird im allgemeinen eine doppelt so hohe Prüfspannung gewählt als bei Wechselspannung, da dies erfahrungsgemäss in der Wirkung etwa gleichwertig ist. Die Prüfdauer sollte nicht zu kurz sein. Eine Minute ist zweckmässig. Ferner werden die Wickel bei gewissenhaften Fabrikanten auf dielektrische Verluste geprüft. Die Kapazität wird kontrolliert.

Der fertige Kondensator erfährt wiederum die Prüfung auf Durchschlagssicherheit, dielektrische Verluste und Kapazität resp. Blindleistung. Zur Spannungsprüfung gehört auch die Spannungsprobe gegen Erde. Firmen, die sehr gewissenhaft prüfen, führen auch an sämtlichen Kondensatoren Dauerläufe durch, beispielsweise 24 Stunden lang mit 1,3facher Nennspannung bei 50 Per./s, d. h. mit der 1,7fachen Nenn-Blindleistung. Die gleiche Prüfung wird mit den Dauerentladewiderständen vorgenommen.

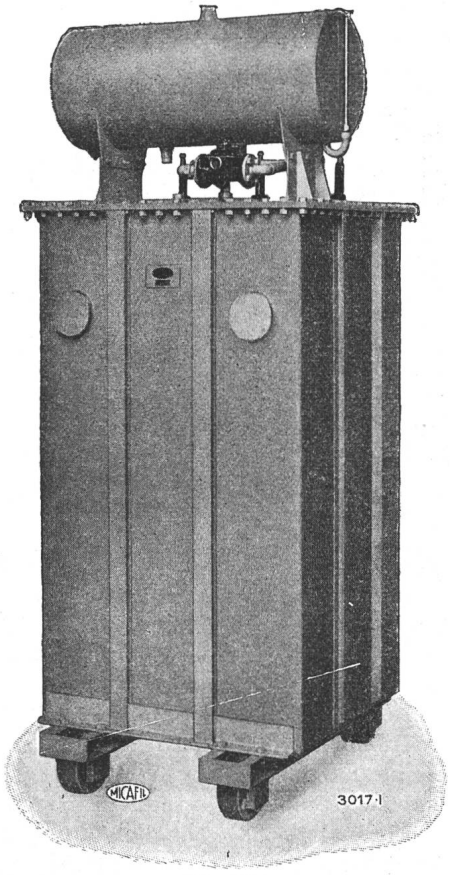


Fig. 17.
Hochspannungs-Kondensator mit Expansionsgefäss und Buchholzschutz, Leistung 500 kVAr bei 50 Per./s. und 3200 V.

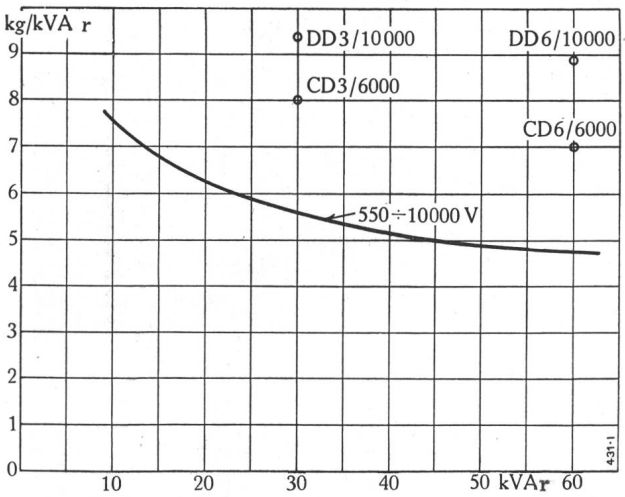


Fig. 18.
Gewicht der Kondensatoren in Funktion der Leistung.

Im übrigen sei auf die vom Comité Electrotechnique Suisse (CES) aufgestellten Leitsätze des SEV für statische Kondensatoren hingewiesen [3]).

[3]) SEV-Publikation Nr. 107.

Sicherung der Kondensatoren.

Da gute Kondensatoren wesentliche Ueberströme, die bei Vorhandensein von Oberwellen auftreten können, ohne Schaden ertragen, legt man im allgemeinen wenig Wert auf einen Schutz gegen solche Ueberströme. Die Erfahrung lehrt, dass nicht selten Ströme vom 1,3- bis 1,8fachen Nennstrom auftreten, ohne dass die Kondensatoren Schaden leiden.

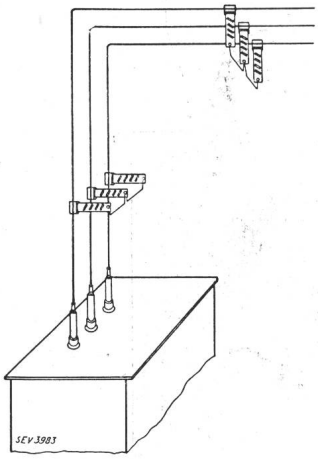


Fig. 19.
Hochspannungs-Entladewiderstände.

Hingegen ist ein Schutz nötig, welcher den Kondensator bei Durchschlag oder Erdschluss abschaltet. Bei Betrachtung der Schutzvorrichtungen muss zwischen Nieder- und Hochspannungskondensatoren, ferner zwischen kleinen und grossen Kondensatoren unterschieden werden.

In Niederspannungskondensatoren sind alle Wickelelemente parallel geschaltet. Bei Durchschlag entsteht somit ein direkter Kurzschluss. Da das Dielektrikum praktisch nicht beliebig dünn gemacht werden kann — dünnere Papiere als etwa 0,008 mm bis 0,009 mm sind in guter Qualität noch nicht erhältlich und sind auch teuer — wird stets die Dreieckschaltung gewählt. Schlägt ein mit drei Sicherungen geschütztes Kondensatorelement durch und schmilzt hiedurch eine Sicherung, so wird das

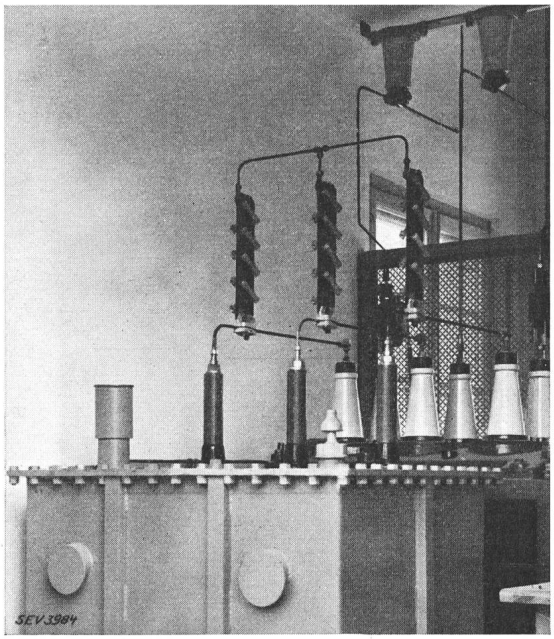


Fig. 20.
Hochspannungs-Kondensatoren mit aufgebauten Entladewiderständen.

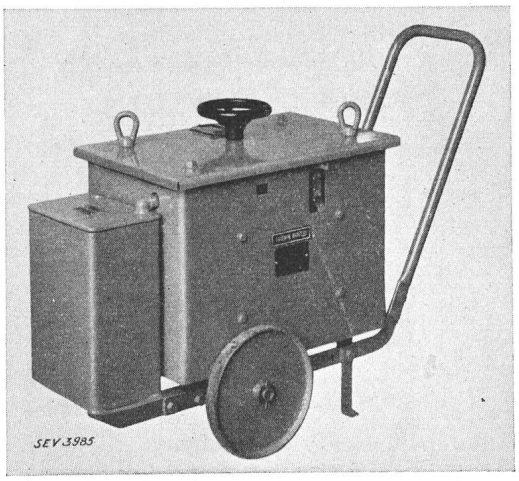


Fig. 21.
Schweissapparat mit angebautem Kondensator.

defekte Element gleichwohl von einem Strom durchflossen; die Folge ist, dass entweder das Element soweit ausbrennt, bis es die Strombahn unterbricht, was meist rasch geschehen wird, oder, namentlich bei Flachwickelkondensatoren, dass benachbarte Elemente angebrannt werden, durch-

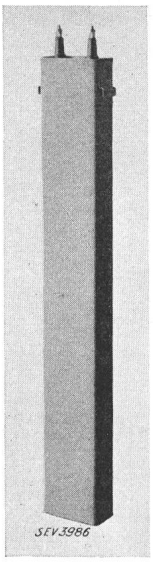


Fig. 22.
Wellenglätter-Kondensator für 3000 Volt, 19 μ F.

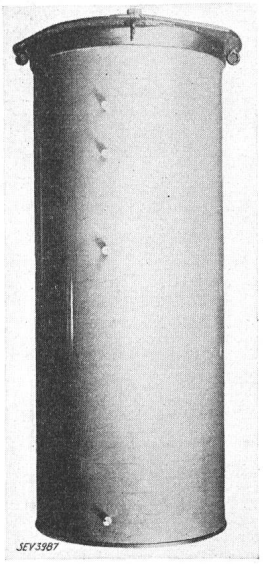


Fig. 23.
Kondensator für 700 kV Gleichspannung, 36 000 cm, für eine Stossprüfanlage. (Von innen elektrisch auf gleiche Spannungsverteilung gesteuerter Isolierkessel.)

schlagen und dann die übrigen Sicherungen durchschmelzen [4]). Trotzdem begnügt man sich im allgemeinen mit drei Sicherungen, da solche Störungen selten sind. Besser ist es, den dreiphasigen Kondensator mit sechs Klemmen zu versehen und jede Phase einzeln herauszuführen. So können die drei Phasen einzeln gesichert werden. Werden die Elemente im Kondensatorinnern einzeln abge-

[4]) Siehe Werdenberg, Betriebserfahrungen mit statischen Kondensatoren, Bull. SEV 1934, Nr. 1, S. 10.

sichert, so ist zwar scheinbar dasselbe erreicht und man kommt dann mit drei Sicherungen aus; da aber diese Sicherungen nicht zugänglich sind, müssen sie relativ stark dimensioniert werden, so dass durchgebrannte Kondensatorwickel oft stark ausbrennen werden, wenn oder bevor diese Sicherungen durchgeschmolzen sind. Werden solche Sicherungen fein genug abgestimmt, so besteht wiederum der Nachteil, dass sie abschmelzen, wenn mit Schaltern ohne teuren Einschaltwiderstand geschaltet wird.

Bei mittleren und grossen Kondensatoren sind automatische dreipolige Schalter zweckmässiger als Sicherungen. Wo die Grenze zugunsten der Schalter liegt, ist jeweils eine Preisfrage.

Für Grosskondensatoren ist der Buchholzschutz zweifellos der richtigste Störungsschutz. Er wäre es auch für kleinere Kondensatoren, wenn billige Kleinapparate erhältlich wären, die auf dem Prinzip der Gasabscheidung beruhen.

In sehr grossen Niederspannungskondensatoren müssen Wickeldurchschläge ausserordentlich heftige Wirkungen haben, da sich die grossen Ladungen der pro Phase parallel geschalteten Elemente über ganz kurze Leitungen auf die Durchbruchsstelle stossartig ausgleichen. Deshalb werden etwa in die Zuleitungen der einzelnen Gruppen kleine, bei Betriebsfrequenz unmerkliche Induktivitäten eingebaut.

Hochspannungskondensatoren besitzen stets in Serie geschaltete Kondensatorelemente. Ein Durchschlag wird daher nicht sofort zu einem Kurzschluss, sondern zunächst nur zu einer Ueberlastung der gesund gebliebenen Elemente führen. Das defekte Element wird, wenn es den Stromweg nicht unterbricht, Gas entwickeln. Die sukzessive, in gewissen Zeitabständen erfolgende Zerstörung der Einzelelemente einer Seriegruppe ist im allgemeinen durch Abwickeln der Elemente klar erkenntlich; das zuerst durchgeschlagene Element hat, abgesehen von der Durchschlagsstelle, ein noch gesundes Dielektrikum, das zweite besitzt eine schwache Wachskruste, da es (z. B. bei drei Serieelementen) längere Zeit unter 1,5facher Nennspannung lief, das dritte endlich ist stark verwachst, da es so lange wie das zweite mit 1,5facher Spannung lief und dann noch einige Zeit mit dreifacher Nennspannung. Sicherungen oder automatische Schalter sprechen nicht an, da sie nicht so empfindlich eingestellt werden dürfen. Der einzig richtige Schutz ist deshalb hier der Buchholz-Apparat. Da er bei kleinen Kondensatoren aus Kostengründen nicht denkbar ist, kommen Wickeldurchschläge oft erst zur Kenntnis des Bedienungspersonals, wenn weitere Elemente durchgeschlagen sind oder wenn ein prasselndes Geräusch wahrgenommen wird.

Im Zusammenhang mit den Sicherungen seien auch die *Entladevorrichtungen* betrachtet. Da die Kondensatoren nach ihrer Abschaltung noch lange Zeit geladen bleiben, müssen sie durch irgendwelche Vorrichtungen entladen werden. Sind sie dauernd mit Motor- oder Transformatorwicklungen verbunden, so erfolgt die Entladung sofort selbsttätig über diese Wicklungen. Für die andern Fälle ist es üblich geworden, Dauer-Entladewiderstände anzuwenden. Diese müssen stets so angeschlossen sein, dass die Entladung auch beim Durchschmelzen von Sicherungen stattfindet.

Es ist heute praktisch möglich, sehr zuverlässige Widerstände für alle Spannungen mit kleinem Raumverbrauch und zu relativ zum Kondensator sehr niedrigen Preisen herzustellen, deren Eigenverbrauch im Verhältnis zu den dielektrischen Kondensatorverlusten klein ist und die den Leitsätzen des SEV entsprechen. Darin wird verlangt, dass sich die Spannung nach dem Abschalten innert einer Minute auf höchstens 50 V senkt.

Fig. 19 und 20 zeigen solche Widerstände für Hochspannung in einer sehr einfachen Form.

Wege der weiteren Entwicklung.

Bei der Schnelligkeit, mit der heute jede technische Entwicklung vor sich geht, haben auch die Kondensatoren innert weniger Jahre einen gewissen Stand der Vollkommenheit angenommen, bei welchem jeder weitere Fortschritt nur noch in kleinen Etappen errungen werden kann, solange nicht ein neues Dielektrikum gefunden wird, das im Verhältnis zum Preis wesentlich höhere elektrische Festigkeit aufweist als das bisherige. Da die Blindleistung der Kondensatoren quadratisch mit der gewählten Spannungsbeanspruchung wächst, ist auf diesem Wege unter Umständen viel zu erreichen.

Näher dem realen Gesichtsfeld liegt ein Fortschritt bei kleinen Spannungen. Das Diagramm Fig. 1 zeigt, dass die Durchschlagsfestigkeit der Papiere in Funktion der Dicke der Gesamtschicht nicht durch den Nullpunkt geht. Dies ist bei kleinen Spannungen ein starker Nachteil, während der gleiche Umstand bei höheren Spannungen nicht mehr so wesentlich ist. Die Kennlinie Fig. 1 ist in neuerer Zeit bereits weiter gegen den Nullpunkt geschwenkt und wird sich mit den immer noch zu erwartenden Fortschritten der Herstellungstechnik feinster Papiere wohl nie ganz, aber doch noch weiter in dieser Richtung bewegen. Dann kann schliesslich das Dielektrikum auch bei kleineren Spannungen (220 V und weniger) so beansprucht werden wie bei höheren.

Ohne Erhöhung der elektrischen Beanspruchung ist eine Leistungsvergrösserung möglich, wenn es gelingt, eine Imprägnierflüssigkeit zu finden, welche die Dielektrizitätskonstante ε vergrössert. Viel ist aber auf diesem Wege kaum zu erhoffen, da ε_{total} nicht proportional mit der Dielektrizitätskonstante des Imprägniermittels wächst. Zum Teil, namentlich in Amerika, wurden an Stelle des Oeles chlorierte Kohlenwasserstoffe verwendet, wie z. B. «Pyranol». Solche Kondensatoren sollen «unbrennbar» sein wegen der Entwicklung flammenerstickender Gase im heissen Zustand. Dieser Eigenschaft stehen aber bis jetzt erhebliche Nachteile gegenüber.

Verschiedene Bestrebungen gehen dahin, das Oel absolut unveränderlich zu erhalten, um den Alterungserscheinungen entgegenzuwirken. Denn wenn dies gelingen würde, dürfte der Kondensator höher beansprucht werden, da der neue Kondensator einen sehr grossen Grad der Sicherheit besitzt. Ueber die hiezu gesuchten Wege ist im Abschnitt «Dielektrika» berichtet.

Nach anderen Vorschlägen wird das Eindringen von Luft durch absorbierende Substanzen verzögert [2]). Einige Möglichkeiten, das Oel gasfrei zu halten, sind in Fig. 5 angedeutet.

Ein weiterer Weg der Entwicklung ist denkbar in der Verwendung erhöhten Druckes auf das Dielektrikum. So werden in Amerika neben den Kondensatoren mit flüssigem Imprägniermittel mit Erfolg auch Papier-Pressgas-Kondensatoren angewandt [5]), allerdings nur für Hochspannung. Die Durchschlagsfestigkeit von ganz gasfreiem Oel ist unter Ueberdruck nicht höher als bei Atmosphärendruck, aber sobald Gas vorhanden ist, wirkt ein erhöhter Druck vorteilhaft [6]). Solche Konstruktionen bedingen aber anderseits Verteuerung der Kessel.

Mit Betrachtungen über die Entwicklungstendenzen frägt man immer wieder nach der Grössenentwicklung der Einheiten. Für die Fabrikanten bietet heute die Herstellung fast beliebig grosser Einheiten keine Schwierigkeiten (Fig. 17). Vom Standpunkt der natürlichen Luftkühlung ohne Rippenkessel liegt die Grenze der Einheiten für Hadernpapiere etwa bei 300 bis 500 kVAr, für Zellulosepapiere bei 100 bis 250 kVAr. Mit Rippenkesseln können demnach Einheiten von einigen 1000 kVAr gebaut werden. Kühlt man nach dem Vorbild der grossen Transformatoren künstlich, so sind ganz ohne Schwierigkeiten beliebig grosse Einheiten denkbar. Da aber hiedurch der spezifische Preis nicht gesenkt werden kann, die Betriebssicherheit aber entschieden verkleinert wird, ist der Sinn derart grosser Kondensatoreinheiten nicht ersichtlich.

Was die Höhe der Betriebsspannung betrifft, bestehen praktisch kaum mehr Begrenzungen.

Aus naheliegenden Gründen hat der Verfasser bei der Wahl der Figuren in erster Linie Fabrikate der Micafil berücksichtigt, sich aber gleichwohl möglichster Objektivität bemüht.

[5]) Bölsterli, Bull. SEV 1931, Nr. 11, S. 245.

[6]) Siehe z. B. franz. Patent Nr. 745 927.

Nötige Unterlagen zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Kabeltypen bei der Planung von Kabelanlagen.

Einige Bemerkungen und Ergänzungen von Prof. *Sten Velander*, Stockholm.

Mit Interesse habe ich den Aufsatz von Herrn *W. Spinath* im Bulletin Nr. 10 d. J. gelesen. Ich möchte aber, um Irrtümer zu verhüten, einige Bemerkungen machen und, um die Berechnungen zu erleichtern, einige Ergänzungen angeben.

Laut den Figuren gibt der Verfasser als günstigsten Querschnitt denjenigen an, bei welchem die Jahreskosten des Kabels gleich den Verlustkosten sind. Dies ist aber nur richtig, wenn man die festen, vom Querschnitt unabhängigen Kosten wegnimmt. Die Jahreskosten einer Kabelstrecke sind (bei gewisser Spannung) $k_1 + k_2 \cdot Q$ und die Verlustkosten $\frac{k_3}{Q}$, wo Q den Querschnitt bedeutet und k_1, k_2 und k_3 Konstanten sind. Die Gesamtübertragungskosten, die also

$$k_1 + k_2 \cdot Q + \frac{k_3}{Q} \text{ betragen,}$$

sind am kleinsten bei einem Querschnitt, der in üblicher Weise durch Derivation bestimmt wird. Man findet dann

$$k_2 - \frac{k_3}{Q^2} = 0 \text{ oder } k_2 \cdot Q = \frac{k_3}{Q}$$

Die in Fig. 2 und 4 von Spinath mit 2 bezeichnete Linie muss also durch den Anfangspunkt gehen. In Fig. 5 gehen die Jahreskosten des 1 kV-Kabels durch den Anfangspunkt, die des 15 kV-Kabels aber nicht. Unterscheiden sich die Kabelkosten für 1 und 15 kV nur in den festen Kosten (k_1), so fallen sie in Fig. 5 zusammen und der wirtschaftliche Querschnitt wird etwa 90 anstatt 66 mm².

Nun sind aber die veränderlichen Kosten bei verschiedenen Spannungen nicht gleich. Die Kostenlinie für 15 kV soll deswegen stärker geneigt sein als die für 1 kV.

Ueber die Kabelkosten als Funktion von Querschnitt, Spannung usw. habe ich verschiedene Untersuchungen gemacht, allerdings für schwedische Verhältnisse; trotzdem interessieren sie vielleicht auch in anderen Ländern. Die Koeffizienten werden sich mit Valuta und Preisniveau ändern; der Aufbau der Formeln aber ist der gleiche. Die Anlagekosten einschliesslich Kabelgräben, Pflaster usw. sind für Spannungen bis 30 kV (Dreiphasenkabel)

$$K_n = (2+7\ p+3\ q)\cdot 1000 + (4000+75\cdot U+0{,}55\ U^2)\cdot \frac{Q}{100} + \\ +8{,}5\ U^2 + (65\ p+30\ q+75)\cdot U + 30\ Q\cdot r$$

und über 30 kV (3 Einphasenkabel)

$$K_n = (2{,}5+7\ p+3\ q)\cdot 1000 + (5000+70\cdot U)\cdot \frac{Q}{100} + \\ +(65\ p+30\ q+315)\cdot U + 30\ Q\cdot r$$

K_n Gestehungskosten pro km Kabel in schw. Kronen,
U Verkettete Uebertragungsspannung in kV,
Q Kupferquerschnitt in mm² (pro Phase),
p Länge des Kabelgrabens in Fels im Verhältnis zur ganzen Länge der Kabelstrecke,
q Länge des Kabelgrabens in gepflasterter Strasse im Verhältnis zur ganzen Länge der Kabelstrecke,
r Kupferpreis in schwedischen Kronen pro kg.

Ein Vergleich zwischen den von *Speidel* [1]) angegebenen Kabelkosten, mit Ausschluss der Verlegungskosten, und den entsprechenden Kosten in Schweden ergibt, dass die Kabelpreise in beiden Fällen in gleichartiger Weise mit dem Querschnitt und der Spannung variieren. Die deutschen Preise sind aber infolge der Verschiedenheit des Preisniveaus und der Wechselkurse beträchtlich höher als die schwedischen.

Im Gegensatz zu den Freileitungen haben Kabel keinen grossen Altwert und deswegen wird im allgemeinen sowohl für das Kupferwertglied als auch für die übrigen Kosten der gleiche Kapitaldienstprozentsatz verwendet.

Kostenformeln wie die genannten, eventuell korrigiert für die Verhältnisse in dem betreffenden Lande, geben die Möglichkeit, auch rein analytisch nicht nur den wirtschaftlichsten Querschnitt, sondern auch die wirtschaftlichste Spannung zu bestimmen. Im letzten Fall müssen gewöhnlich auch die Kosten der Schaltanlagen berücksichtigt werden. Diese

[1]) Bull. SEV 1933, S. 506.