Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 40 (1949)

Heft: 21

Artikel: Hartpapierdurchführung für Höchstspannungen

Autor: Kappeler, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060724

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: 04.02.2026

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

40. Jahrgang Nr. 21 Samstag, 15. Oktober 1949

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Hartpapierdurchführung für Höchstspannungen

Von *H. Kappeler*, Zürich-Altstetten

621.315.626.027.8

In der vorliegenden Arbeit soll abgeklärt werden, bis zu welchen Höchstspannungen die reine Hartpapier-Kondensatordurchführung in Transformatoren Verwendung finden kann. Die Probleme des Durchschlages, der Erwärmung und der Alterung werden untersucht und es wird insbesondere gezeigt, wie durch neue Fabrikationsmethoden die Betriebssicherheit gesteigert und die Prüf- und Überschlagspannungen bedeutend erhöht werden können.

Die Bedingungen für kleinste Abmessungen werden aufgestellt und die Versuche beschrieben, die an einer Transformatordurchführung für eine Nennspannung von 400 kV ausgeführt worden sind. Die Ergebnisse zeigen, dass es beim heutigen Stand der Technik möglich ist, massive trockene Durchführungen für Dauerspannungen bis 500 kV gegen Erde und Prüfspannungen von 1000 kV (Effektivwerte) betriebssicher herzustellen.

La présente étude a pour but de déterminer la tension maximum pour laquelle les isolateurs de traversée à condensateurs, du type sec, en papier bakélisé, peuvent être utilisés dans la construction des transformateurs. Après avoir traité les problèmes du percement, de l'échauffement et de l'altération on indique comment, à l'aide d'un nouveau procédé de fabrication, la sécurité, les tensions d'essai et de contournement ont pu être sensiblement augmentées. Les équations pour le calcul des plus petites dimensions sont contrôlées par des essais effectués sur un prototype pour une tension nominale de 400 kV. Les résultats prouvent qu'il est possible aujourd'hui de fabriquer avec sécurité des traversées massives, sèches, pour des régimes permanents à 500 kV contre terre et pour des tensions d'essai de 1000 kV (valeurs efficaces).

Die Weiterentwicklung der Leistungstransformatoren von immer höheren Betriebsspannungen stellt auch den Erbauer der Durchführungen vor heikle Isolationsprobleme. Durchführungen der Nennspannung 220 kV sind heute sicher fundierte Gebilde, während noch vor einem Jahrzehnt die Beherrschung dieser Spannung an der Grenze des Möglichen zu sein schien. Die Zukunft steckt das Ziel bedeutend höher und verlangt Nennspannungen, die in der Gegend von 400 kV liegen. Es ist deshalb abzuklären, ob eine Durchführung für solche Anforderungen mit den zur Verfügung stehenden Mitteln überhaupt realisierbar ist.

1. Werkstoffe

Als Isolierstoffe für Hochspannungsdurchführungen finden allgemein Papier, Öl, Hartpapier und Porzellan Verwendung. Versuche unter Heranziehung neuerer Kunststoffe, beispielsweise von Polyäthylen, Polyesterharzen und Araldit als Presslinge, als Giesslinge oder verarbeitet in Verbindung mit Faserstoffen, haben einerseits die ausgezeichneten dielektrischen Eigenschaften solch neuer Stoffe gezeigt, anderseits aber auch die Schwierigkeit ihrer Verarbeitung im Hinblick auf die Fabrikation von Hochspannungsdurchführungen deutlich vor Augen geführt.

Porzellan scheidet als Hauptdielektrikum für Hochspannungsdurchführungen infolge seiner relativ hohen Warmverluste bei Nennspannungen über 220 kV aus. Hingegen sind die keramischen Werkstoffe für Überwürfe bei Freiluftaufstellung nicht wegzudenken.

Bezüglich dielektrischer Verluste ist als bester Werkstoff zweifellos *ölimprägniertes Zellulosepapier* anzusprechen. Voraussetzung für gutes Funktionieren einer ölimprägnierten Durchführung ist aber ein völlig hermetisches Einschliessen des Wickelkörpers innerhalb eines keramischen Behälters, eine Forderung, die bei Höchstspannungen nicht leicht zu erfüllen ist.

Trotz den überragenden dielektrischen Eigenschaften des ölimprägnierten Papiers haben sich die *Hartpapiere*, d. h. die mit Phenol- oder Kresolharz durchsetzten und verklebten Zellulosepapiere wenigstens in Europa im Bau von Kondensatordurchführungen den absoluten Vorrang erworben. Der Grund liegt in der ausserordentlichen Einfachheit, Robustheit und Betriebssicherheit des gewickelten Hartpapierkörpers. Die Hartpapierdurchführung bedarf keines hermetisch abgeschlossenen Isolierbehälters wie die Öldurchführung. Für Innenräume genügt das nackte Material, und wenn für Freiluft zum Schutze des Hartpapiers gegen die Witterung ein Porzellanüberwurf vorgesehen werden muss, so spielt er für die Betriebssicherheit selbst eine untergeordnete Rolle. In der Tat arbeitet eine Hartpapierdurchführung bei der Beschädigung des Porzellanüberwurfes weiter und der Transformator fällt nicht ausser Betrieb. Anders aber bei der Öldurchführung oder ölimprägnierten Papierdurchführung. Tritt hier ein Leck im Porzellanmantel auf, so sind die Folgen viel schwerer. Das Imprägniermittel läuft aus und die Durchführung bricht elektrisch zusammen, wobei die Gefahr eines Transformatorbrandes stark erhöht wird. Bezüglich der Betriebssicherheit muss also der Hartpapierdurchführung ein bedeutender Vorrang eingeräumt werden. Hiezu kommt ferner die Möglichkeit, Hartpapier konstruktiv allen Wünschen an-

zupassen, ohne an vorgegebene keramische Teile gebunden zu sein.

Aus den beschriebenen Gründen lag der Anreiz nahe, die reine Hartpapierdurchführung so zu vervollkommnen, dass sie auch den Ansprüchen der Höchstspannungen in jeder Beziehung zu genügen vermag. Die dabei auftauchenden Probleme seien kurz beschrieben.

2. Prüfspannung und Durchschlagfestigkeit

Als eine erste Frage interessiert es zu wissen, ob die Durchschlagfestigkeit des Materials für die ins Auge gefassten Nennspannungen von 400 kV ausreicht unter Berücksichtigung der natürlichen Grenzabmessungen, die durch Rohmaterial und durch vorhandene Fabrikationsmaschinen gegeben sind.

Wie schon an anderer Stelle [1] [1]) ausführlich erörtert worden ist, muss man sich vom Begriff der Durchschlagfestigkeit als einer Materialkonstanten frei machen. Die Durchschlagfestigkeit eines Isolierstoffes ist unter anderem in starkem Masse von der Beanspruchungsdauer abhängig. Wenn man Fig. 1 betrachtet, welche die Durchschlagfestigkeit eines guten Hartpapieres (Super-Resocel) wiedergibt, so erkennt man, dass Werte von 1000 kV/cm möglich sind, wenn es sich um Stossbeanspruchungen von Mikrosekunden handelt, während die Festigkeit auf einen ca. 50mal kleineren Wert heruntersinkt, sobald die Beanspruchungsdauer auf Monate und Jahre ausgedehnt wird.

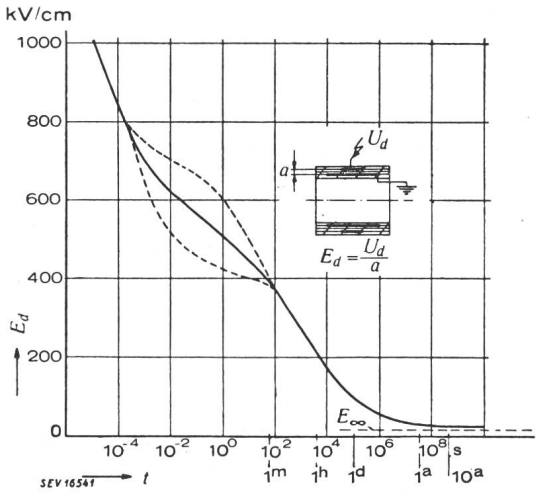

Fig. 1

Durchschlagsfestigkeit dünner Schichten aus Hartpapier (Superresocel) in Funktion der Beanspruchungsdauer (10^{-4} Sekunden bis 10 Jahre)

E_d Scheitelwert
E_∞ Grenzwert für unendlich lange Beanspruchung

Diese steil abfallende Charakteristik ist für die Dimensionierung aller Durchführungen, die einem Dauerbetrieb ausgesetzt sind, recht hinderlich, weil das Verhältnis von Dauerspannung zu Prüfspannung niemals so extrem sein wird. Betrachten wir z. B. Durchführungen für den Netzbetrieb, so wird nach den Prüfvorschriften der verschiedenen Länder die 1-Minuten-Prüfspannung den 5fachen und die Stossprüfspannung den 8fachen Wert der Nennspannung Pol–Erde wohl kaum überschreiten. Wir können deshalb die hohe Durchschlagfestigkeit des Materials bei Stoss und bei der 1-Minuten-Prüfspannung gar nicht ausschöpfen, weil wir wegen der Dauerspannung Pol–Erde gezwungen sind, die Durchführung unverhältnismässig stark zu dimensionieren. Dafür dürfen wir hier festhalten, dass unter diesem Gesichtspunkt eine Schicht-Durchschlaggefahr bei Schaltüberspannungen und atmosphärischen Überspannungen gar nicht besteht.

3. Dauerbetrieb und Alterung

Aus dem Gesagten entnehmen wir, dass die Radialabmessung der Höchstspannungs-Durchführung zunächst nur von der zulässigen Dauerbeanspruchung abhängt, welche ihrerseits eng verknüpft ist mit der wichtigen Frage der Alterung. Diesem Problem kommt bei der Höchstspannung spezielle Wichtigkeit zu, und wir müssen uns etwas näher damit befassen, weil es doch gilt, das Material bis zu seinen Grenzen zu beanspruchen, um damit die Dimensionen auf ein erträgliches Mass herabzusetzen.

Der Begriff der Alterung soll all jene mechanischen und elektrischen Eigenschaften umfassen, die mit zunehmender Dauer der elektrischen Beanspruchung eine Verschlechterung erleiden. Bei den Durchführungen dürfen wir uns auf die elektrischen Eigenschaften beschränken, da die mechanische Beanspruchung meist eine ganz untergeordnete Rolle spielt. Die elektrische Alterung, bedingt durch dauernde Überbeanspruchung, bedeutet eine ständige Abnahme der Isolationsfestigkeit bis zum schliesslichen Zusammenbruch der Isolation.

Die elektrische Alterung wird in ihrer Wirkung verschärft durch gleichzeitige Einwirkung der Temperatur und der Feuchtigkeit. Die Feuchtigkeit verursacht eine Erhöhung der dielektrischen Verluste, doch schützt sich die Durchführung in gewissem Sinne selbst, indem durch die höhern Verluste vermehrte Trocknung einsetzt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass in unserem Klima selbst eine nackte Durchführung nach jahrelanger Dauer ihren Verlustfaktor kaum erhöht; bei Freiluftdurchführungen mit Porzellanüberwurf und hermetischer Abdichtung muss die Feuchtigkeit überhaupt nicht berücksichtigt werden.

Der Einfluss der Temperatur auf den Alterungsprozess ist schon oft Gegenstand der Untersuchung gewesen. Man hat gefunden, dass eine Wärmebehandlung sämtliche mechanischen und elektrischen Festigkeitswerte eines organischen Isolierstoffes herabsetzt. Es gibt keine Temperaturgrenze, unter welcher das Isoliermaterial nicht angegriffen wird, hingegen nimmt die Geschwindigkeit der Alterung mit fallender Temperatur so stark ab, dass bei Temperaturen um 100 °C (einer Temperatur, die in der Durchführung selten überschritten wird) von einer Alterung durch Wärme praktisch nicht mehr gesprochen werden kann.

Der Einfluss zu hoher Dauerspannung äussert sich in erster Linie darin, dass an den Rändern der

[1]) Literaturangaben am Schluss.

Kondensatorbeläge einer Durchführung, wo naturgemäss die grössten Feldstärken herrschen, mechanische Zerstörung des Isoliermaterials durch die Korona-Entladung auftritt, eine Art Erosion oder langsame Aushöhlung und Zertrümmerung des Isolierstoffes, die schliesslich zum Durchschlag führen kann. Die genaue Erforschung dieser Erscheinung [1, 2] hat nun ergeben, dass es für jede Durchführung *eine Grenzspannung gibt, unter welcher überhaupt keine elektrische Alterung mehr möglich ist.* Zur Abtastung dieser Grenzspannung wurden die Ergebnisse an Elementarkondensatoren verwertet, die bis zu 20 Jahren ständig unter Spannung standen. In Fig. 2 wurde als Funktion der Schichtdicke die Feldstärke jedes Versuchskondensators aufgetragen, bei welchem auch nur die geringste Randerosion konstatiert werden konnte. Die Hüllkurve dieses Punkthaufens stellt die der gesuchten Grenzspannung entsprechende Grenzfeldstärke dar, unter welcher keine Alterung zu finden ist.

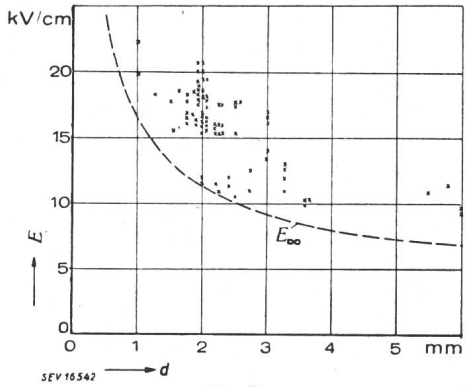

Fig. 2
Hartpapierdurchführungen mit Randerosion
Effektivwerte der Radialfeldstärken E in Funktion der Dielektrikumsschichtdicke d. Grenzkurve der Beanspruchung E_∞, unter welcher auch bei unendlich langer Dauer keine Erosion mehr stattfindet

Eine weitere Untersuchung der erwähnten Erscheinung ergab, dass die Grenzkurve der Randerosion identisch ist mit jener Kurve, die sich ergibt, wenn man die Korona-Einsatzspannung von freien Belagrändern in Luft in Funktion der Schichtdicke aufträgt (Kurve *1* in Fig. 3). Unter Korona wird dabei jene Spannung verstanden, bei der die Ionisierung die ersten schwachen Glimm- und Hissgeräusche erzeugt, deren hochfrequente Schwingungen auch mit geeigneten Verstärkern nachgewiesen werden können, oder bei der die Leitfähigkeit der Luft so verändert wird, dass sich Verlustfaktor und scheinbare Kapazität sprunghaft ändern.

Nach den Beobachtungen des Verfassers erfolgt dieser Korona-Einsatz unter Luft und Öl nach einem Gesetz, das mit demjenigen des Toeplerschen Gleitfunkeneinsatzes bis auf die Konstante identisch ist.

In Fig. 3 sind die Korona-Einsatzspannungen von Metallrändern und halbleitenden Belagschichten mit Widerstandsrand in Luft und unter Öl in Funktion der Schichtdicke aufgezeichnet, die für Hartpapier-Durchführungen in folgende Formeln gefasst werden können.

Korona: $U_k = k\, d^{0,45}$ (U_k in kV, d in cm) (1)

worin die Konstante k folgende Werte annehmen kann:

$k_1 = 4{,}3$ für Metallrand in Luft (2)
$k_2 = 6{,}2$ für Widerstandsrand in Luft (3)
$k_3 = 15{,}2$ für Metallrand und Widerstandsrand unter Öl (4)

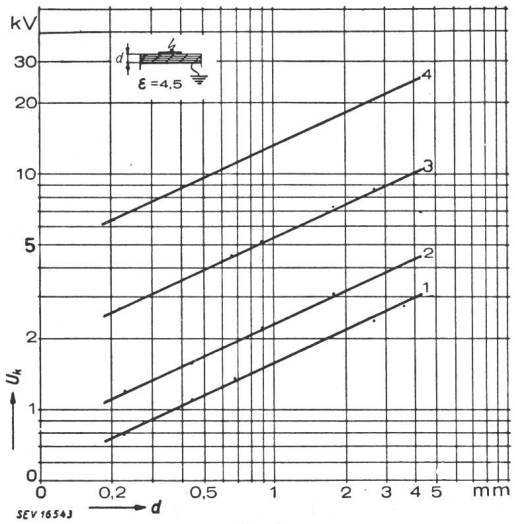

Fig. 3
Koronaeinsatz und Gleiteinsatzspannungen an freien Belagrändern von Kondensatorendurchführungen
1 Koronaeinsatz für Metallrand in Luft
2 Koronaeinsatz für Widerstandsrand in Luft
3 Koronaeinsatz für Metallrand und Widerstandsrand unter Öl
4 Toeplersche Gleiteinsatzspannung

Die Gleiteinsatzspannung nach Toepler [3] ist durch die Kurve *4* in Fig. 3 gegeben:

Gleitfunken: $U_{gl} = k_4\, d^{0,45}$ (U_{gl} in kV, d in cm) (5)

$k_4 = 39$ für Metallränder und Widerstandsränder in Luft und unter Öl.

Aus der ganzen Untersuchung über die Alterung und den Korona-Einsatz zeigt sich, auf welchem Wege ein Gewinn in den radialen Abmessungen herauszuholen ist. Dies geschieht einerseits dadurch, dass die Schichtdicken zwischen den Metallarmaturen verkleinert und an Stelle der metallischen Einlagen halbleitende Schichten verwendet werden. Auf diese Weise wird es möglich, selbst für die höchsten Spannungen den Wicklungskörper so dünn zu halten, dass keine fabrikatorischen Schwierigkeiten auftreten und trotzdem die Gewähr besteht, dass die Durchführung der Alterung nicht unterworfen ist.

4. Der Wärmedurchschlag

Die bisher gemachten Überlegungen haben gezeigt, dass bezüglich Alterung und Beherrschung der Prüf- und Stoßspannungen eine Erhöhung der Betriebsspannung bis an die 400-kV-Grenze noch keine unüberwindlichen Schwierigkeiten bietet. Eine weitere wichtige Frage bedarf nun aber der Abklärung, nämlich die des Wärmegleichgewichtes. Für den Wärmedurchschlag ist vor allem jener Betriebszustand gefährlich, bei dem die verkettete Netzspannung zwischen Pol und Erde an der Durch-

führung liegt. Ein solcher Zustand kann in gelöschten Netzen unter Umständen mehrere Stunden andauern und es ist zu untersuchen, ob die Durchführung dieser Beanspruchung gewachsen ist.

Die Gesetze des Wärmedurchschlages sind von Dreyfus [4] und anderen [5] gründlich behandelt worden. Darnach ist in quasihomogenen Isolierstoffen ein Durchschlag allein schon dadurch möglich, dass die im Innern erzeugte dielektrische Verlustwärme nicht mehr vollständig nach aussen abgeführt werden kann. Der Isolierstoff erhitzt sich immer mehr und bricht infolge innerer Verkohlung zusammen (Fig. 4). Die Theorie gipfelt in der Aussage, dass ein Isolierstoff mit bestimmten thermischen und elektrischen Eigenschaften nur bis zu einer gewissen Höchstspannung belastet werden kann. Dabei ist diese «Kippspannung» praktisch unabhängig von der Isolierschichtdicke und nur eine Funktion der Umgebungstemperatur. Für eine Kondensatordurchführung errechnet sich nach Dreyfus die Kippspannung nach folgender Formel:

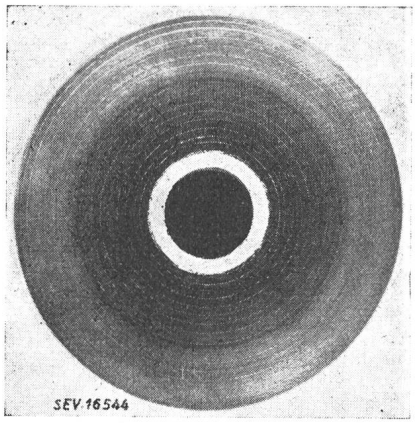

Fig. 4
Schnitt durch eine extrem überbeanspruchte Durchführung, bei der die im Innern erzeugte Wärme nicht mehr nach aussen abgeführt werden konnte
Die Überhitzung ist kenntlich an der Bräunung der Hartpapierschichten, die gegen das Leitrohr zu immer stärker wird. Die innersten Schichten sind total verkohlt. Die Durchführung erlitt einen Wärmedurchschlag

$$U_{Kipp.} = m \sqrt{\frac{2\,\lambda}{\gamma\, p_a}} \quad \text{in kV} \qquad (6)$$

Darin bedeuten λ die Wärmeleitfähigkeit des Materials in $\frac{\text{W}}{\text{cm °C}}$; p_a den spezifischen Verlust in W/cm³ des Isolierstoffes bei der Temperatur ϑ_a, wenn er in radialer Richtung mit der Feldstärke 1 kV/cm beansprucht wird. γ ist der Exponent der Temperatur-Verlustfunktion nach der Gleichung

$$p = p_a\, e^{\gamma(\vartheta - \vartheta_a)}$$

und m ein Faktor, der nur vom Verhältnis des Flanschdurchmessers und Bolzendurchmessers abhängt und für die praktisch in Frage kommenden Verhältnisse $\frac{r_a}{r_i} \approx 5$ den Wert 0,85 annimmt.

Für eine Durchführung, die in heissem Transformatorenöl arbeiten soll und aus einem guten Hartpapier besteht $\left[\vartheta_a = 90\,°,\ \lambda = 0{,}0022\ \frac{\text{W}}{\text{cm °C}}\right.$ $\left.\gamma = 0{,}038\,°\,\text{C}^{-1},\ p_{90°} = 1{,}9 \cdot 10^{-6}\ \frac{\text{W}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{kV}^2}\right]$, ergäbe sich nach Gleichung (6) eine Kippspannung von 210 kV, d. h. eine Spannung, die weit von den zu wünschenden 400 kV entfernt wäre.

Eine nähere Untersuchung der Gleichung (6) zeigt aber nun, dass die Voraussetzungen, unter denen sie abgeleitet wurde, bei der wirklichen Ausführung nicht zutreffen oder nicht zutreffen müssen. Kehren wir deshalb zum Ausgangspunkt zurück und betrachten eine Kondensatordurchführung, die wir als relativ langes Rohr stilisieren wollen, bei dem die Wärme zur Hauptsache in radialer Richtung abgeführt wird.

Die zeitliche (t) und örtliche (r) Temperaturverteilung ist durch folgende partielle Differentialgleichung gegeben:

$$\varrho\, c\, \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda\, \frac{1}{r^2}\, \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial (\lg r)^2} + p_{(E,\vartheta)} \qquad (7)$$

ϱ Dichte.
c spezifische Wärme.
ϑ Temperatur zur Zeit t in der Zylinderschicht vom Radius r.

Die Gleichung besagt, dass die zeitliche Änderung der Temperatur ϑ in irgendeinem Punkte der Durchführung nicht nur von der örtlichen Änderung in jenem Punkte abhängt, sondern auch von den Wärmemengen p, die in jedem cm³ der Durchführung durch die dielektrischen Verluste erzeugt werden. Was nun das Problem ausserordentlich kompliziert und die Gleichung (7) überhaupt nicht allgemein lösen lässt, ist der Umstand, dass unter Annahme einer konstanten Klemmenspannung diese spezifischen Verlustwärmen nicht nur von der Temperatur ϑ, sondern von Ort zu Ort auch von der jeweils herrschenden Feldstärke E abhängen. Bei der Ableitung der Gleichung (6) wurde die Feldstärke als konstant über die ganze Durchführung vorausgesetzt, ferner die Wärmeabfuhr nach dem Leiter und die axiale Wärmeabgabe im Isolator vernachlässigt. Nun ist aber die Feldstärke gerade bei Höchstspannungs-Durchführungen von Ort zu Ort stark verschieden; ferner können die genannten Wärmeströme ganz beträchtliche Werte annehmen, so dass uns die Beziehung (6) niemals mehr genügen kann. Wir sind gezwungen, die Gleichung (7) in eine Differenzengleichung umzuwandeln und sie auf mühsamem Wege nach graphischem Verfahren punktweise zu integrieren, um alle Faktoren mitberücksichtigen zu können und damit die Kipptemperaturen und Kippspannungen verlässlich bestimmen zu können. An einem Beispiel wird später gezeigt, dass der Wärmedurchschlag für unser Vorhaben kein unüberwindliches Hindernis darstellt.

5. Überschlagspannung in Luft

Während wir uns bisher mit den Eigenschaften des Hartpapiers an sich zu befassen hatten, so müs-

sen wir nun noch die Erscheinungen betrachten, die an der Trennschicht zwischen Hartpapier und dem umgebenden Medium auftreten. Vor allem zwingt uns die kleine dielektrische Festigkeit der Luft dazu, dem Oberteil der Durchführung eine Länge zu geben, die der Festigkeit der Luft, nicht derjenigen des Hartpapiers entspricht. Nun darf man aber bei Höchstspannungsdurchführungen immer mit einem kräftigen Porzellan-Überwurf am Oberteil der Durchführung rechnen, und es stellt sich damit für den Durchführungskörper aus Hartpapier im Innern dieses Porzellanmantels das Problem, wie stark seine Länge reduziert werden darf, ohne dass sich die Charakteristik der Durchführung wesentlich verändert.

Zunächst ist darauf hinzuweisen, dass durch die Steuerung der Durchführung Gleiterscheinungen nicht mehr auftreten können. Hingegen kann die Überschlagspannung zwischen Kappe und Flansch der Durchführung selbst durch sehr gleichmässige Potential-Steuerung gegenüber einer einfachen Spitzen-Funkenstrecke nicht wesentlich erhöht werden. Umgekehrt ausgedrückt, hat man gesehen, dass die gesteuerte Länge der Durchführung bis auf verbleibende 50...60 % der Überschlagdistanz verkürzt werden kann, ohne dass die Überschlagspannung dadurch vermindert würde. Erst bei weiteren Verkürzungen erfolgt ein merkliches Absinken der Überschlagspannung. Diesen Sachverhalt muss man bei Höchstspannungsdurchführungen voll ausnützen, da sie aus Gründen der Koordination relativ lange Oberteile benötigen. Die Überschlag-Stossspannung einer im Transformator eingebauten Durchführung ist nämlich stark polaritätsabhängig, da die Kappe gegenüber dem Transformatordeckel ähnlich einer Anordnung Spitze—Platte wirkt. Um eine gleiche Festigkeit bei positivem und negativem Stoss zu erreichen, ist es deshalb nötig, eine stabförmige Sicherheitsfunkenstrecke derart anzubringen, dass das untere Horn stark über den Transformatordeckel hinausragt, eine Massnahme, die natürlich wesentlich längere Durchführungs-Oberteile nötig macht.

6. Überschlagspannung und Längsfestigkeit unter Öl

Während wir den Durchschlag quer zur Schicht des Isolierstoffes als ungefährlich erkannt haben, trifft dies nun keineswegs zu in bezug auf den Durchschlag längs der Schicht. Die elektrische Festigkeit in Längsrichtung ist eine Zehnerpotenz schlechter als in Querrichtung, und es ist bisher auch bei den besten Hartpapieren nicht gelungen, sie in dieser Richtung wesentlich zu verbessern. Überdies kommt eine starke Verminderung der Durchschlagsfestigkeit mit zunehmender Isolatorlänge zum Ausdruck (Fig. 5, untere Kurve). Wenn wir also für eine 400-kV-Durchführung eine Durchschlagspannung von zirka 1000 kV verlangen, was eine Isolierlänge unter Öl von zirka 150 cm erfordern würde, wird der Fall ganz hoffnungslos, wenn man bedenkt, dass als längste Wickelkörper zurzeit nur solche von 310 cm Länge möglich sind und allein zur Feldsteuerung des Oberteiles eine Länge von mindestens 200 cm benötigt wird.

Diese Schwierigkeiten können durch eine einschneidende und im ersten Augenblick gewagt erscheinende Massnahme beseitigt werden. Wie be-

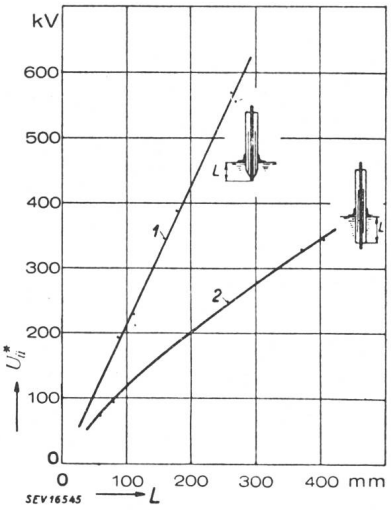

Fig. 5
Effektivwerte der Überschlagspannung von Kondensatordurchführungen unter Öl in Funktion der Länge des Ölunterteils
Durchführung mit freien (*1*) und geschützten (*2*) Belagenden

kannt, wird eine Hochspannungsdurchführung zur Steuerung des elektrischen Feldes mit Kondensatorbelägen mit Vorteil so unterteilt, dass eine möglichst gleichmässige Feldverteilung längs der Oberfläche erzielt wird. Man hat nun das die Kondensatorbeläge schützende Isoliermaterial bis zu den Rändern der Beläge weggedreht und gefunden, dass eine solche Anordnung in reinem Transformatoröl eine ausserordentlich hohe Durchschlagfestigkeit in Längsrichtung besitzt, jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Einlagen aus einem halbleitenden Material, statt aus Metall bestehen. Die neue Bauart setzt deshalb ein Fabrikationsverfahren [2]) voraus, mit welchem man äusserst dünne, klebende, halbleitende Beläge erzeugen kann, die ausserdem noch den Vorteil der höheren Koronaspannung aufweisen (Fig. 3). Die Wirkung, die durch das Freilegen der Belagränder erzielt werden kann, kommt in Fig. 5, obere Kurve, deutlich zum Ausdruck, wo Festigkeiten gegenüber der üblichen Anordnung von mehr als doppeltem Wert erzielt werden. Die Erklärung liegt in der bekannten Erscheinung, dass kurze Entladungsstrecken in Öl oder an der Trennfläche Öl—Hartpapier eine sehr viel höhere Festigkeit aufweisen als lange Strecken. Durch das Freilegen der Belagränder wird die ganze Isolatoroberfläche in kurze Entladungsstrecken fein unterteilt und man hat dadurch ein Mittel in der Hand, mit sehr viel kürzeren Unterteilen auszukommen und damit den Spannungsbereich bei gegebener Papierbreite nach oben bedeutend zu erweitern.

7. Durchführung mit stark verkürztem Unterteil

Es sollen nun die elektrischen Erscheinungen an Unterteilen mit freiliegenden Belagrändern beschrieben und die Formeln zur Berechnung der optimalen Verhältnisse abgeleitet werden. Es ist

[2]) Verfahren von der Micafil entwickelt.

nicht einfach so, dass mit längeren Unterteillängen die Überschlagspannungen proportional grösser werden, wie man aus Fig. 5 bei flüchtiger Betrachtung entnehmen könnte.

Die Faktoren, die die Überschlagspannung am Ölunterteil bestimmen, sind: die Gleit-Einsatz-Spannung unter Öl, die Gleit-Büschelentladung unter Öl und die dielektrische Festigkeit des Öles zwischen den Endarmaturen. Zahlreiche Versuche über das Zusammenspiel dieser Faktoren führten zu folgenden Schlüssen:

a) Die auch bei sehr langen Unterteilen maximal erreichbare Überschlagspannung ist gegeben durch die Radialfeldstärke. Dies gilt für die dünnsten bis zu den dicksten Isolatoren. Der maximale Radialgradient ist verantwortlich für den Gleiteinsatz und legt damit eine obere Grenze der Überschlagspannung fest, die durch keine Massnahmen höher gesetzt werden kann.

Wir haben bereits in Fig. 3 und Gleichung (5) den Toeplerschen Gleitfunkeneinsatz für eine dünne Hartpapierschicht angegeben. Die Radialfeldstärke, bei der Gleiten eintritt, ist deshalb für den betrachteten Teilkondensator:

Gleiten:

$$E_r = \frac{U_{gl}}{d} = \frac{k_4}{d^{0,55}} \quad (E_r \text{ in kV/cm; } d \text{ in cm}) \tag{8}$$

k_4 ist eine Konstante, die praktisch nur von der Dielektrizitätskonstante des Hartpapiers, nicht aber vom umgebenden Medium abhängt. Für den Gleitfunkeneinsatz bietet deshalb die Anwesenheit von Öl gegenüber Luft zunächst keinen Vorteil; durch feine Unterteilung der Beläge ist man aber in der Lage, den Gleiteinsatz an sich hoch hinaufzusetzen.

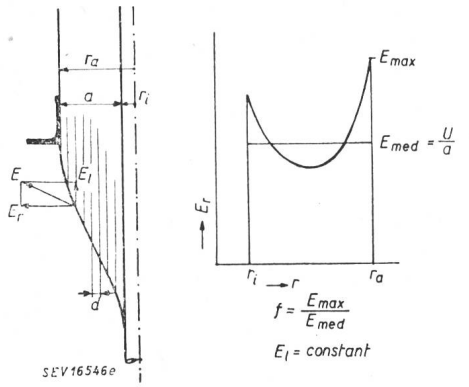

Fig. 6
Feldstärkeverteilung längs der Oberfläche einer Durchführung mit freiliegenden Belagrändern und gleichmässigem Potentialabfall längs einer Mantellinie
E_l Axialfeldstärke
E_r Radialfeldstärke

Wie hoch ist nun die Gleiteinsatzspannung der ganzen Durchführung? Setzt man bei der in Fig. 6 gezeichneten Durchführung einen konstanten Abfall des Potentials längs einer Mantellänge voraus, so ergibt sich namentlich bei den dickwandigen Körpern mit kleinem Leiterdurchmesser eine stark ungleichmässige Verteilung der Radialfeldstärke E_r. Sollen beim Hochfahren der Spannung sämtliche Schichten gleichzeitig zu gleiten anfangen, so wird man nach (8) den grössten Feldstärken die kleinsten Schichtdicken zuordnen müssen.

Geht man von der kleinsten Schichtdicke d_{min} aus, die man fabrikatorisch noch zulassen kann, und bezeichnet man mit dem Ungleichmässigkeitsgrad f das Verhältnis von maximaler zu mittlerer Radialfeldstärke E_m, so erhält man die Gleiteinsatzspannung U_{gl}^* der ganzen Durchführung von der Materialdicke $a = r_a - r_i$:

$$U_{gl}^* = E_m\, a = \frac{E_{max}}{f}\, a \tag{9}$$

$$E_{max} = \frac{U_{gl}}{d_{min}} = \frac{k_4}{d_{min}^{0,55}} \tag{10}$$

$$U_{gl}^* = k_4 \frac{a}{f\, d_{min}^{0,55}} \tag{11}$$

(U_{gl}^* in kV, a und d in cm)

Gleichung 11 besagt, dass zur Erreichung einer bestimmten Überschlagspannung eine gewisse Materialdicke a unbedingt nötig ist.

b) Bei der Berechnung der Koronaeinsatzspannung in Luft und unter Öl für die ganze Durchführung ergibt sich in ähnlicher Weise aus (3) und (4):

Korona:

$$U_{k2}^* = k_2 \frac{a}{f\, d_{min}^{0,55}} \quad \text{bzw.} \quad U_{k3}^* = k_3 \frac{a}{f\, d_{min}^{0,55}} \tag{12}$$

d. h. eine Beziehung, die auch für eine bestimmte Dauerspannung Pol—Erde eine minimale Materialdicke a vorschreibt.

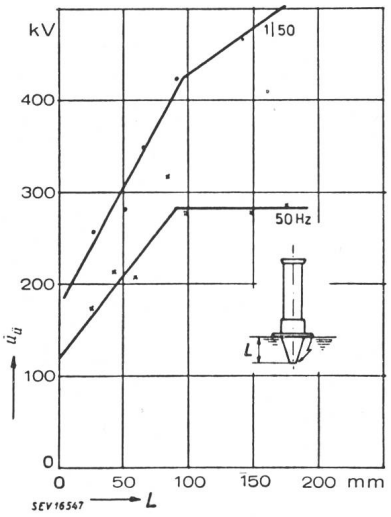

Fig. 7
45-kV-Durchführung mit freiliegenden Belagrändern und von gegebener Dicke
Scheitelwerte der Überschlagspannungen in Öl bei Industriefrequenz und Stoss in Abhängigkeit von der Länge des Ölunterteils

c) Die Länge des Ölunterteils spielt für den Gleitfunkeneinsatz, wie aus (11) hervorgeht, keine Rolle. In der Tat kann man eine Durchführung, wie dies in Fig. 7 dargestellt ist, bis zu einer kritischen Länge kürzen, ohne dass die Überschlagspannung abnimmt. Unterhalb dieser Grenze ist der Überschlag durch die Erscheinung des Gleitbüschels oder der Streifenentladung charakterisiert. Der Überschlag tritt in diesem Bereich dann ein, wenn der

Saum der Streifenentladung, die vom Rand eines Kondensatorbelages ausgeht, den Rand des nächsten Belages erreicht. Die Saumbreite s der Streifenentladung zwischen zwei Belägen beginnt nach den Beobachtungen des Verfassers mit der Koronaeinsatzspannung und wächst von diesem Schwellenwert an proportional mit der Überspannung (Fig. 8). Die Saumbreite hängt damit von der

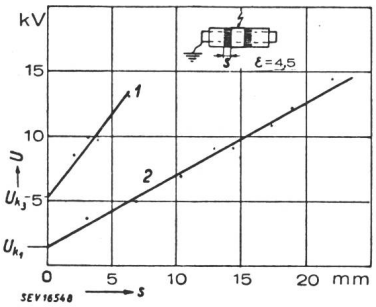

Fig. 8
Streifenentladung in Luft und unter Öl an freiliegenden Belagrändern
Schichtdicke des Isoliermaterials = 1 mm
U Effektivwerte
s Streifenlänge
1 in Öl
2 in Luft

Schichtdicke und dem umgebenden Medium ab. Vor allem ist der Einfluss des letzteren bedeutend; bei einem Rand unter Öl ist nicht nur die Einsatzspannung höher als in Luft, sondern auch die Überspannung zur Erzeugung einer bestimmten Saumbreite. Zwischen angelegter Spannung und Saumbreite gilt unter Öl:

$$U - U_{k3} = k_5\, s \quad (U \text{ in kV}, s \text{ in cm}) \qquad (13)$$

$$k_5 = 12{,}8 \text{ für Einlagen unter Öl}$$

Der Überschlag zwischen zwei aufeinanderfolgenden halbleitenden Belägen, deren Distanz längs der Oberfläche l cm beträgt, erfolgt somit bei der Spannung

$$U_{ü} = k_5\, l + U_{k3} \qquad (14)$$

Da über die ganze Länge L des Unterteils das Potential gleichmässig verteilt ist, beginnen nicht nur alle Ränder beim Hochfahren der Spannung gleichzeitig zu glimmen, sondern es erreichen auch alle Glimmsäume bei weiterer Spannungssteigerung zu gleicher Zeit die nächste Einlage und leiten den Überschlag ein. Es gilt somit:

$$\frac{U^*_{k3}}{L} = \frac{U_{k3}}{l} \quad \text{und} \quad \frac{U^*_{ü}}{L} = \frac{U_{ü}}{l} \qquad (15)$$

eingesetzt in (14):

Streifenüberschlag:

$$U^*_{ü} = k_5\, L + U^*_{k3} \quad (U \text{ in kV}, L \text{ in cm}) \qquad (16)$$

Mit (11), (12) und (16) können wir nun die optimalen Abmessungen des Unterteils ausrechnen. Dabei müssen wir zwei Fälle unterscheiden:

1. Fall: $U^*_{ü} \leqq \frac{k_4}{k_3}\, U^*_{k2}$ d. h. die Überschlagspannung des Isolators sei relativ niedrig gegenüber der Koronaeinsatzspannung. Die Dicke a des Isolators ist damit allein von der Koronaeinsatzspannung nach (12) abhängig und die minimal nötige Länge ergibt sich aus (16) zu

$$L_{min} = \frac{U^*_{ü} - U^*_{k3}}{k_5} \quad (L \text{ in cm}, U \text{ in kV}) \qquad (17)$$

2. Fall: $U^*_{ü} \geqq \frac{k_4}{k_3}\, U^*_{k2}$ d. h. die Überschlagspannung des Isolators sei relativ hoch, so dass die Koronaeinsatzspannung nach (12) keine Rolle mehr spielt. Die Dicke des Isolators ist damit nur von der Überschlagspannung nach (11) abhängig. Die Länge des Isolators werden wir hingegen so kurz wählen, dass der Streifenüberschlag mit dem Gleiteinsatz zusammenfällt. Wir erhalten deshalb durch Gleichsetzen von (11) und (16) unter Berücksichtigung, dass

$$U^*_{gl} = U^*_{k3}\, \frac{k_4}{k_3}$$

$$L_{min} = U^*_{ü}\, \frac{k_4 - k_3}{k_4\, k_5} \quad (L \text{ in cm}, U \text{ in kV}) \qquad (18)$$

Mit den Ausdrücken (17) und (18) sind wir nun in der Lage, für gegebene Werte der Betriebspannung und Prüfspannung die minimale Länge des Ölunterteils einer Durchführung zu bestimmen, und zwar werden wir die maximale Betriebspannung Pol—Erde gleich der Korona-Einsatzspannung U^*_{k2} setzen und die Überschlagspannung ausgehend von der Prüfspannung unter Beobachtung eines Sicherheitsfaktors annehmen.

Nun werden aber an Durchführungen auch Ansprüche in bezug auf Stossfestigkeit gestellt, und es bleibt somit noch die Frage zu beantworten, wie sich die stark verkürzten Unterteile unter Stossbeanspruchung verhalten. Die Versuche wurden mit Wellen von 1|50 ausgeführt und ergaben eine ähnliche Charakteristik (Fig. 7, obere Kurve), wie sie bei Wechselspannung festgestellt worden ist, jedoch mit dem Unterschied, dass die Durchschläge bei Stoss gegenüber der Wechselspannung durchwegs bei einem etwa 50 % höheren Scheitelwert erfolgen. Sofern also nicht Überschlagstosspannungen gefordert werden, deren Scheitelwert mehr als das Doppelte des Effektivwertes der Überschlagspannung bei Industrie-Frequenz betragen — dies wird die Regel sein —, so ist keine Gefahr bei Stoss vorhanden.

7. 400-kV-Durchführung

Auf Grund der neuen Erkenntnisse wurde als Beispiel die in Fig. 9 abgebildete trockene 400-kV-Hartpapierdurchführung ausgeführt. Für die Berechnung wurde eine Prüfspannung von 960 kV und eine Überschlagspannung am Ölteil von 1400 kV (Effektivwert) zugrunde gelegt. Ferner sollte die Durchführung eine Betriebsspannung von 230 kV dauernd und 400 kV während 8 h gegen Erde ertragen können. Mit dieser Annahme berechnet sich ein Körperdurchmesser von 400 mm und eine minimale Ölunterteillänge von 700 mm.

Die Typenprüfung der Durchführung stiess auf erhebliche Schwierigkeiten, da die nötigen Einrichtungen für diese Höchstspannungen in den bestehenden Laboratorien zur Zeit meist fehlen. So konnte an Stelle der 960 kV die Prüfspannung nur bis 850 kV gesteigert werden; bei weiterer Erhöhung der Spannung erfolgte der Durchschlag

gegen die Kesselwand des Ölbehälters. Ebenso war die Prüfung mit Spannungsstössen höher als 1800 kV nicht durchführbar. Bei allen Spannungsproben erfolgten jedoch keine Durchschläge und Überschläge an der Durchführung, insbesondere nicht am kurzen Ölteil.

Von besonderem Interesse war die Nachprüfung des thermischen Gleichgewichtes und damit verbunden die Ermittlung der Kippspannung. Da die Kippspannung stark von den Umgebungstemperaturen abhängt, haben wir den ungünstigen Fall untersucht, wo die Durchführung bis an den oberen Rand des Flansches in 90 ° heisses Öl taucht.

Nach einer 36stündigen Anwärmung der ganzen Durchführung in 90 ° heissem Öl wurde die Spannung von 300 kV angelegt und der Verlustfaktor während 24 h laufend gemessen. Fig. 10 zeigt als Ergebnis dieses Versuches eine eindeutige Wärmestabilisierung bei 300 kV. Das Diagramm enthält ferner die mit Thermoelementen gemessenen Leitertemperaturen.

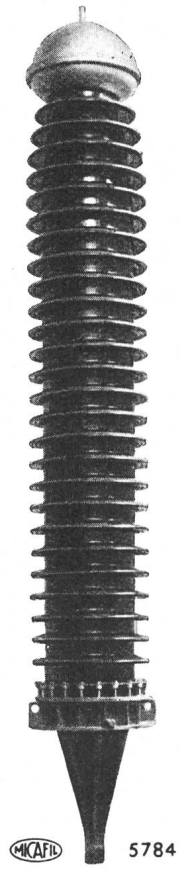

Fig. 9
Trockene 400-kV-Kondensator-Durchführung für Transformatoren (Micafil)

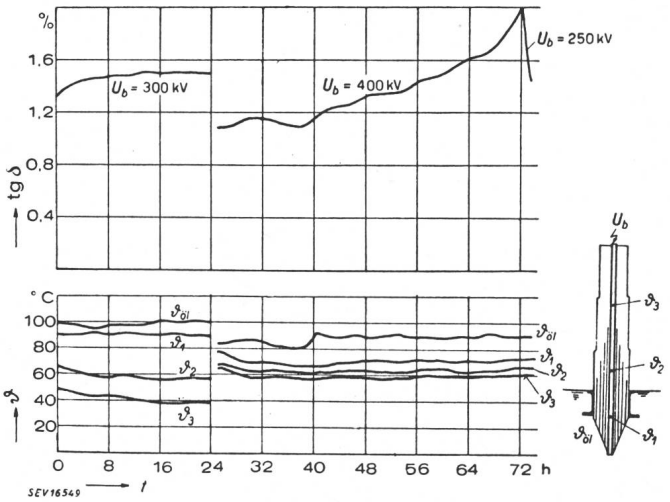

Fig. 10
Dauerversuch an 400-kV-Durchführung zur Bestimmung des Wärmegleichgewichtes
Diagramm des Verlustfaktors und der Umgebungstemperaturen
U_b Effektivwerte der zwischen Leiter und Flansch angelegten Dauerspannung

Nach einem kurzen Unterbruch wurde die Spannung auf 400 kV erhöht, wobei gleichzeitig die untere Kabeleinführung den Verhältnissen im Transformator entsprechend nachgeahmt wurde. Diese Spannung wurde nun während weiteren 48 h an der Durchführung belassen. Die immer mehr ansteigenden Verluste zeigen, dass die Kippgrenze bereits überschritten worden ist und die Durchführung daher bald einem Wärmedurchschlag entgegengehen würde. Die Spannung wurde deshalb auf 250 kV, d. h. auf die maximale Betriebsspannung Leiter—Flansch gesenkt. Dabei zeigte sich das ausserordentlich wichtige Ergebnis, dass diese Spannung den während 48 h hoch hinaufgetriebenen labilen Zustand nicht aufrecht zu erhalten vermag, sondern ein rapides Absinken des Verlustfaktors und einen neuen Gleichgewichtszustand zur Folge hat. Ein 48-stündiger Erdschluss würde selbst in einem gelöschten 400-kV-Netz ohne weiteres ertragen.

Der Dauerlauf wurde an der Versuchsdurchführung weiter fortgesetzt und die Kippspannung schliesslich zu 360 kV ermittelt.

Eine weitere Untersuchung betraf die Temperaturverhältnisse im Innern des Isoliermaterials der Durchführung. Da die direkte Messung der Temperatur mit eingebauten Thermoelementen auf sehr grosse Schwierigkeiten stösst, wurde der bereits in Abschnitt 4 angetönte Weg beschritten, indem auf graphischem Wege die Grundgleichung (7) der Temperaturleitung punktweise integriert wurde. Natürlich müssen hiefür die Materialeigenschaften bekannt sein, insbesondere die Abhängigkeit der spezifischen Verluste von der Temperatur. Ferner musste berücksichtigt werden, dass gemäss der Feldstärkeverteilung die Verluste auch von Ort zu Ort verschieden sind. Fig. 11 zeigt als Resultat die Temperaturverteilung über den Querschnitt der 400-kV-Durchführung bei den im Dauerversuch (Figur 10) benützten Spannungen. Die Spannungen 230 kV und 300 kV ergeben stationäre Zustände,

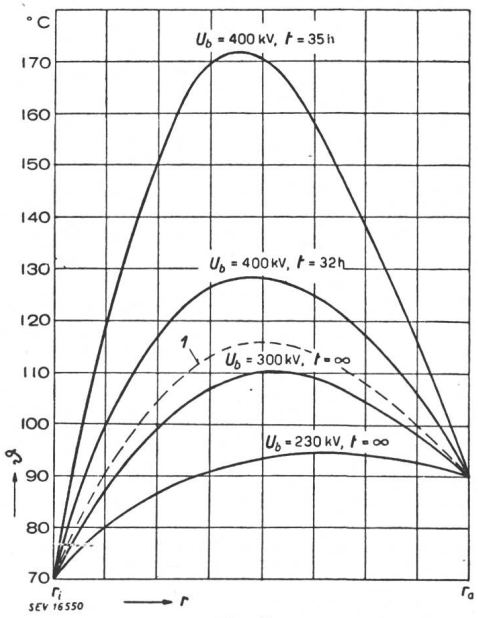

Fig. 11
Radiale Temperaturverteilung im Innern einer 400-kV-Durchführung aus Hartpapier. Unterteil und Flansch in 90° heissem Öl
Stationäre Zustände bei 230-kV- und 300-kV-Betriebspannung Pol-Erde. Bei 400 kV deutlich labiler Zustand. Kippspannung 360 kV (Kurve *1*)

bei 360 kV tritt das Kippen ein und bei 400 kV erkennt man bereits das labile Verhalten durch den raschen Anstieg der Temperatur.

Die Dauerversuche mit extremen, aber einfach zu überblickenden Randbedingungen geben uns nun die Möglichkeit, die wahren Kippspannungen und Übertemperaturen zu bestimmen in Verhältnissen, wie sie tatsächlich auf einem Transformator auftreten. Eine kleine Rechnung zeigt, dass mit einfachen

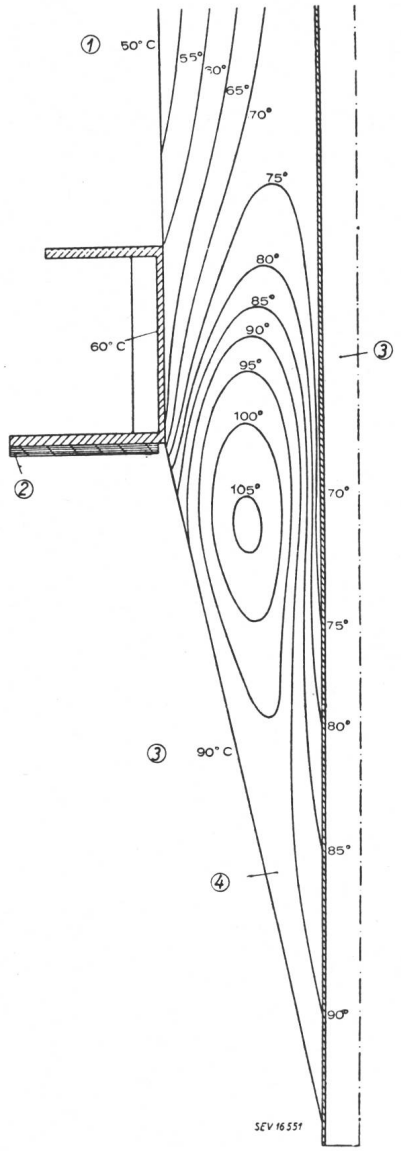

Fig. 12
Temperaturfeld einer Transformatordurchführung bei Beanspruchung mit der Dauerspannung Pol—Erde von 500 kV (Effektivwert)
Unterteil in Öl von 90 °C. Stabiles Wärmegleichgewicht. Heisseste Stelle im Innern 107 °C
1 Luft
2 Isolation
3 Öl
4 Hartpapier

Mitteln der Flansch der Durchführung auch bei 90 ° heissem Öl und unter Einwirkung der Sonnenstrahlung auf einer Temperatur von 60...70 ° C gehalten werden kann. Durch diese Temperatursenkung am Flansch wird die Kippspannung der Durchführung sofort beträchtlich hinaufgesetzt, da sich die Abkühlungsverhältnisse nun bedeutend günstiger gestalten, wie aus Fig. 12 hervorgeht, die das Temperaturfeld einer Hartpapierdurchführung bei einer Spannungsbeanspruchung von 500 kV zwischen Leiter und Flansch nach Erreichen des stationären Zustandes darstellt. Man sieht, dass einerseits ein beträchtlicher Teil der Wärme auch axial abzufliessen vermag und dass anderseits die heisseste Stelle der Durchführung in den konischen Unterteil gedrängt wird, wo die Übertemperaturen ohnehin schon kleiner sind. Mit einer maximalen Körpertemperatur von 107 ° C (entsprechend 500 kV) befinden wir uns bei dieser Anordnung noch unterhalb der Kippgrenze. Diese Überlegungen gelten auch bei gleichzeitiger Strombelastung der Durchführung, da deren Einfluss sehr klein gehalten werden kann. Die das Kupferkabel durchfliessenden Ströme erzeugen Leiterverluste, die normalerweise einige zehn W betragen, d. h. eine Wärmemenge, die über das den Kopf und das Leiterrohr ausfüllende Transformatoröl mit unmerklicher Übertemperatur abgeführt wird.

Zusammenfassend kann man auf Grund der durchgeführten Berechnungen und Versuche die Grenze für den Verwendungsbereich der trockenen Hartpapierdurchführungen angeben. Vom Erwärmungsstandpunkt aus bietet es keine Schwierigkeiten, Spannungen zwischen Pol und Erde von 500 kV dauernd zu beherrschen. In geerdetem Netze würde dies einer Nennspannung von über 700 kV entsprechen. Die zulässigen Prüf- und Überschlagspannungen sind gegeben durch die Fabrikationsbreiten der Isolierpapiere, wenn man nicht die mit grossem Nachteil behaftete und nur noch selten angewandte Fabrikationsmethode der bandweisen Bewicklung benützen will. Bei der klassischen Methode des Aufwickelns von Papierbahnen können Durchführungen für Prüfspannungen bei Industriefrequenz von 1000 kV und Überschlagstoßspannungen von 1800 kV akzeptiert werden. Vom fabrikatorischen Standpunkt aus gesehen sind einteilige Isolierkörper für 400 kV Nennspannung gut herzustellen; die obere Grenze dürfte bei zirka 500 kV Nennspannung liegen. Die Probleme, welche sich durch die beabsichtigte Einführung der Nennspannung von 400 kV für den Durchführungsbau stellten, können als sicher gelöst betrachtet werden.

Literatur

[1] *Kappeler, H.:* Progrès réalisés dans la construction des isolateurs de traversée à condensateur. Cigré 1946 Rapport 208.

[2] *Kappeler, H.:* Micafil-Nachr". 1945.

[3] *Toepler, M.:* Über die physikalischen Grundgesetze der in der Isolationstechnik auftretenden Gleiterscheinungen. Arch. Elektrotechn. Bd. 10(1922), Nr. 5/6, S. 157...185.

[4] *Dreyfus, L.:* Mathematische Theorien für den Durchschlag fester Isoliermaterialien. Bull. SEV Bd. 15(1924), Nr. 7, S. 321...344.

[5] *Berger, K.:* Zur Theorie des Wärmegleichgewichts fester Isolationen. Elektrotechn. Z. Bd. 47(1926), Nr. 23, S. 673...677.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *H. Kappeler,* Oberingenieur der Micafil A.-G., Zürich-Altstetten.