Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 17 (1926)
Heft: 12

Artikel: Beitrag zur technischen Berechnung von Kondensator-Durchführungen
Autor: Imhof, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058883

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: 23.08.2025

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

Bezirken des betreffenden Netzes verbunden, derart, dass jeder Bezirk von zwei Kraftwerken gespeist werden kann. Abgesehen von der Reduktion der Kurzschlussleistungen erreicht man damit eine sehr grosse Sicherheit des Betriebes, weil bei Ausfall einer Stromquelle sofort die andere dafür einspringen kann. Fig. 26 a zeigt die allgemein übliche, Fig. 26 b die amerikanische Schaltung eines städtischen Stromversorgungsnetzes. Es ist sehr wohl möglich, dass in Europa auch Netze vorhanden sind, die nach diesen Grundsätzen geschaltet sind; die konsequenteste Anwendung in grösserem Masstabe scheint hingegen in Amerika gemacht worden zu sein.

Mit der Freiluft- und Hallenbauart haben wir heute neue Formen für elektrische Schaltanlagen gefunden, die bei grösster Betriebssicherheit und kleinstem Kostenaufwand eine bisher unerreichte Uebersichtlichkeit der Apparate und Leitungen ergeben.

Es braucht kaum noch erwähnt zu werden, dass die meisten dieser verschiedenen Lösungen im Schaltanlagebau auch heute noch angewendet werden, je nach Grösse und Zweck der betreffenden Anlage. Auch hier entscheidet in letzter Linie die Wirtschaftlichkeit, so dass es vorkommen kann, dass sich örtlich dicht beieinander Anlagen befinden, wovon die einen vielleicht an den Anfang, die andern an den Schluss der erläuterten Entwicklungsreihe hingehören. Das Aufsuchen der für den Einzelfall richtigsten Lösung, sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Beziehung, ist Sache der projektierenden Ingenieure und setzt weitgehende allgemeine und technische Kenntnisse voraus.

Beitrag zur technischen Berechnung von Kondensator-Durchführungen.

Von Prof. *A. Imhof*, Winterthur.

621.319.4 (004) + 621.315 (004)

Der Autor legt eine Methode für die rasche Berechnung von Kondensatordurchführungen dar, unter Berücksichtigung der praktisch wichtigsten Daten. Sie wird für gleiche axiale und radiale Ungleichmässigkeit unter Annahme unendlich dünner Schichten und solcher von endlicher Dicke durchführt. Für letztere wird ein Beispiel gerechnet. Ferner wird die Berechnung auf gleichmässige axiale Beanspruchung bei Verwendung von Schichten ungleicher Dicke gezeigt.

L'auteur expose une méthode pour le calcul rapide des isolateurs de traversée, qui tient compte des données pratiques les plus importantes. Il applique cette méthode au cas d'une répartition inégale du gradient du potentiel, mais identique le long de l'axe et dans le sens du rayon, dans l'hypothèse de couches infiniment minces d'abord, puis d'épaisseur finie. Enfin le calcul est fait pour une contrainte diélectrique axiale régulière, en supposant des couches d'épaisseur inégale.

In den letzten Jahren haben sich einige Publikationen mit der Berechnung von Kondensator-Durchführungen befasst. In sehr gründlicher Weise hat Dr. Humburg [1]) die verschiedenen Grundprinzipien dargetan. Er befasst sich mit drei fundamentalen Fällen:

1. Berechnung auf gleichmässige, radiale Feldstärke.
2. Berechnung auf gleichmässige, axiale Feldstärke.
3. Berechnung auf gleiche axiale und radiale Ungleichmässigkeit.

Dr. Humburg zeigt, dass die zweite Methode die kleinsten Dimensionen ergibt. Auf die technische, d. h. für die Praxis zugerichtete Berechnungsweise geht die betreffende Arbeit nicht ein. Eine Berechnungsmethode, die der Praxis direkt dienen soll, wurde von Schwaiger [2]) angegeben. Er führt die Begrenzungslinien der leitenden Folien in die Rechnung ein und will so die zeitraubende Kapazitätsberechnung vermeiden. So bestechend dieser Gedanke zunächst ist, haftet ihm der grosse Nachteil an, dass die Güte der Spannungsverteilung nicht ohne weiteres daraus ersichtlich ist und somit zu einer kritischen Berechnung doch noch dielektrische

[1]) Die Berechnung von Kondensatordurchführungen. Archiv für Elektrotechnik, Bd. 12, Heft 6, 1923.
[2]) Ueber die Berechnung von Kondensatordurchführungen. El. Betr. 1923, Heft 16.

Widerstände zu berechnen sind. Auch Kuhlmann[3]) hat sich mit der Berechnung von Kondensatorklemmen befasst. In sehr einfacher Weise wird in der betreffenden Abhandlung die Tangentialfeldstärke berechnet und so die günstige Oberflächengestaltung ermittelt. Nicht berücksichtigt ist aber dabei die richtige radiale Spannungsverteilung, die mit Rücksicht auf dielektrische Verluste möglichst gleichmässig sein soll.

Die folgenden Berechnungsangaben sollen einen sehr schnellen Entwurf von Durchführungen ermöglichen mit Zugrundelegung derjenigen Daten, die praktisch am ehesten vorliegen. Die Raschheit der Rechnung und der Erlangung eines Ueberblickes in die Qualität des Resultates ist hier besonders wesentlich, weil eine Menge von Einflüssen (Fassungslänge, Bolzendurchmesser, Tangential- und Radialbeanspruchung) zu studieren sind, um in jedem Falle die günstigsten Anordnungen und Dimensionen zu schaffen.

Das Verhältnis der maximalen radialen Feldstärke zur minimalen sei mit *radialem Ungleichmässigkeitsgrad* u_r benannt, analog das Verhältnis der maximalen axialen zur minimalen axialen Beanspruchung mit *axialem Ungleichmässigkeitsgrad* u_a. Für die zweite Methode ist $u_r = u_a = u$, für die dritte Methode ist $u_a = 1$. Mit der ersten Methode beschäftigen wir uns nicht, weil sie praktisch fast ohne Bedeutung ist.

Da und dort steht man in Fachkreisen den Kondensatorenklemmen noch skeptisch gegenüber. Eine Potentialsteuerung durch leitende Einlagen wird sich jedoch unbedingt bei den heutigen hohen Spannungen durchsetzen, zeigt doch die Erfahrung dem Hochspannungstechniker stets von neuem, dass nur durch sorgfältige Steuerung eine Materialverschwendung zu umgehen ist und manche Konstruktion erst möglich wird. Die Publikation von L. Dreyfus[4]) machte weitere Kreise aufmerksam, dass infolge der dielektrischen Verluste grosse Durchführungen aus Hartpapier für Dauerbetrieb nicht herstellbar seien. Seither hat aber die Hartpapierfabrikation zufolge vieler Anstrengungen grosse Fortschritte gemacht, indem die dielektrischen Verluste sehr vermindert werden konnten. Es gelingt, Klemmen für die höchsten Spannungen herzustellen, wie dies als Beispiel die in Fig. 1 und 2 wiedergegebenen Durchführungen für 150 und 220 kV der Micafil A.-G. bezeugen. Bei beiden ist der allzu starkwandige Gesamtpapierkörper nach einem Verfahren des Verfassers in Teilzylinder unterteilt und das Glimmen an der Fassung wird bis nahe an die Ueberschlagsspannung unterdrückt. Ueber dem Oberteil durch Porzellan gedeckt, werden solche Klemmen für Freiluftstationen verwendbar (Fig. 3).

1. Berechnung auf gleiche axiale wie radiale Ungleichmässigkeit.

Diese Annahme ergibt besonders gute Uebersichtlichkeit bei der Berechnung und führt auch zu fabrikationstechnisch angenehmer Dimensionierung. Werden alle Schichten gleich dick gemacht, so müssen, damit die Bedingung gleicher axialer wie radialer Ungleichmässigkeit der Beanspruchung erfüllt ist, auch alle Längenabstufungen gleich sein, *so dass die Begrenzungskurven der leitenden Einlagen gerade Linien werden.* Nach Wahl der mittleren radialen wie axialen Beanspruchung, ferner des Bolzendurchmessers und der Fassungslänge, ergibt sich also sofort der Durchmesser der Klemme wie auch die Länge aller Einlagen. Indes muss auch der Bedingung eines möglichst kleinen Ungleichmässigkeitsgrades $u = u_r = u_t$ Rechnung getragen werden, wodurch man in der Wahl des Bolzendurchmessers und der Fassungslänge nicht mehr frei ist. Bedenkt man, dass die dielektrischen Verluste des Bakelitpapiers dem Quadrat der Feldstärke proportional sind, so wird man auf die Wichtigkeit einer gleichmässigen radialen Beanspruchung gelenkt. Bei einem Ungleichmässigkeitsgrad von 1,8 sind die Verluste in den meist beanspruchten

[3]) Formgebung der Durchführungsisolatoren aus Hartpapier mit Metalleinlagen. Etektro-Journal 1924.

[4]) Mathematische Theorien für den Durchschlag fester Isoliermaterialien. Bulletin des S. E. V. 1924, No. 7.

Schichten $1{,}8^2 = 3{,}24$ mal grösser als in den wenigst beanspruchten Schichten. Die kleinste Ungleichmässigkeit wird cet. par. erreicht, *wenn innerste und äusserste Schicht gleich, die mittlere Schicht am wenigsten beansprucht ist.* Diese Bedingung ist demnach bei jeder Berechnung angenähert einzuhalten.

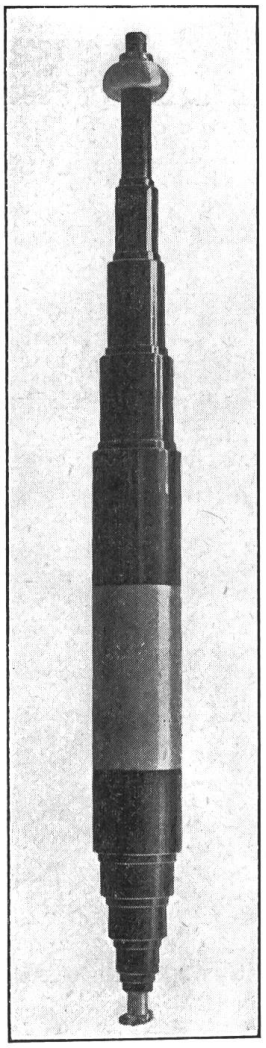

Fig. 1.
150 kV Kondensator-Durchführung.

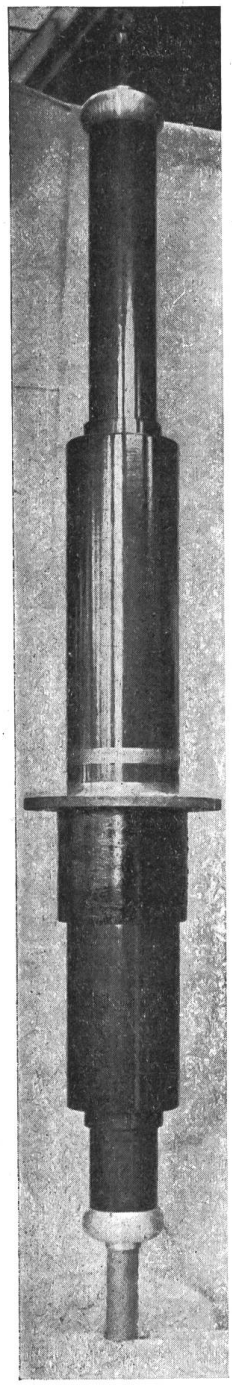

Fig. 2.
220 kV Kondensator-Durchführung.

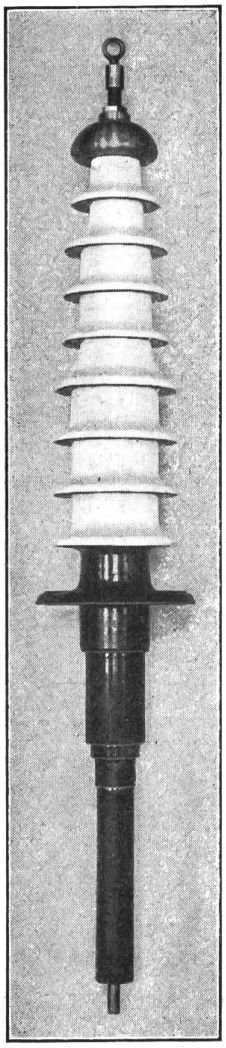

Fig. 3.
150 kV Kondensator-Durchführung für Freiluftanlagen.

a) Berechnung unter Annahme unendlich dünner Schichten.

Mit dieser Näherungsannahme, die übrigens in den meisten Fällen auch bei *Schichten endlicher Dicke* mit genügender Genauigkeit anwendbar ist, ergeben sich sehr einfache Beziehungen, die teilweise auch unter b benützt werden.

Bei symmetrischer Beanspruchung, also gleicher Beanspruchung in äusserster und innerster Schicht, müssen deren Kapazitäten einander gleich sein:

$$2\, r_o \pi\, l_o \frac{1}{d} = 2\, r_n \pi\, l_n \frac{1}{d}$$

$$r_o = \frac{l_n\, r_n}{l_o}. \qquad (1)$$

r_o = Bolzenradius.
r_n = Fassungsradius.
l_o = Länge der innersten Stanniolschicht.
l_n = Fassungslänge, resp. Länge der äussersten geerdeten Metallschicht.
d = Dicke der sehr dünnen Schichten.

Ferner führen wir die Bezeichnungen ein:

V_p = Prüfspannung.
H_r = Mittlere radiale Feldstärke.
H_L = Mittlere axiale Feldstärke am in Luft befindlichen Klemmenteil.
H_u = Mittlere axiale Feldstärke am in Oel befindlichen Klemmenteil.

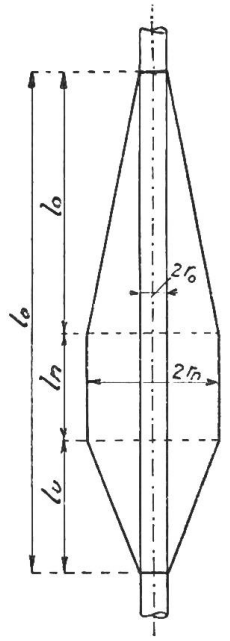

Fig. 4.

Die Gleichung (1) geht damit über in:

$$r_o = \frac{l_n \left\{ r_o + \frac{V_r}{H_r} \right\}}{l_n + V_p \left\{ \frac{1}{H_L} + \frac{1}{H_u} \right\}}$$

und nach einiger Entwicklung:

$$r_o = \frac{l_n}{H_r \left\{ \frac{1}{H_L} + \frac{1}{H_u} \right\}}. \qquad (2)$$

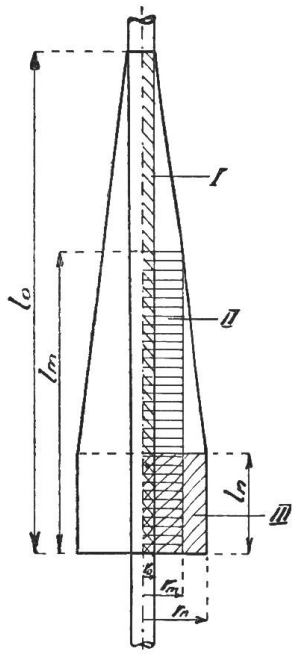

Fig. 5.

Aus dieser Gleichung ergibt sich nach Wahl der fiktiven (mittleren) radialen und axialen Beanspruchungen der Radius des zentralen Bolzens. Interessant ist die Feststellung, dass das Verhältnis $\frac{l_n}{r_o}$ *unabhängig von der Spannung und nur eine Funktion der gewählten Beanspruchungen ist.*

Soll der Ungleichmässigkeitsgrad eine gewisse Grösse nicht überschreiten, so darf r_o, resp. l_n nicht zu klein gewählt werden. Zur Berechnung des Ungleichmässigkeitsgrades dienen folgende Ueberlegungen: Die Kapazität einer dünnen zylindrischen Schicht ist bei gleicher Dicke aller Schichten proportional ihrer Länge und ihrem Zylinderradius. Betrachtet man die Länge bildlich als „Kraft", den Radius als Hebelarm, so erscheint die Kapazität als „Moment" M. In Fig. 5 ist eine Klemme unten senkrecht zur Achse begrenzt angenommen und dafür ist die Länge des Oberteiles um diejenige des abgeschnittenen Ueterteiles vergrössert. Die Kapazitäten, resp. Momente der einzelnen Schichten sind darin sehr einfach als Rechtecke ausmessbar.

Bei *symmetrischer Beanspruchung* ist diese ein Minimum in der Mittelschicht mit dem Radius r_m, ein Maximum in der äussersten Schicht mit dem Radius r_n oder der innersten Schicht mit dem Radius r_o.

$$r_m = \frac{r_o + r_n}{2}. \qquad l_m = \frac{l_o + l_n}{2}.$$

$$M_m = r_m\, l_m \qquad M_n = r_n\, l_n.$$

$$= \frac{1}{4}(r_o + r_n)(l_o + l_n).$$

$$u = \frac{M_m}{M_n} = \frac{(r_o + r_n)(l_o + l_n)}{4\, r_n\, l_n}. \tag{3}$$

r_n und l_n können substituiert werden durch Einführung der Prüfspannung V_p und der Feldstärken.

$$u = \frac{\left(2r_o + \frac{V_p}{H_r}\right)\left\{2r_o H_r\left(\frac{1}{H_L} + \frac{1}{H_u}\right) + V_p\left(\frac{1}{H_L} + \frac{1}{H_u}\right)\right\}}{4r_o H_r\left(r_o + \frac{V_p}{H_r}\right)\left(\frac{1}{H_L} + \frac{1}{H_u}\right)}$$

$$= \frac{(2r_o H_r + V_p)(2r_o H_r + V)}{4r_o H_r (r_o H_r + V_p)} = \frac{(2r_o H_r + V_p)^2}{4r_o H_r (r_o H_r + V_p)}. \tag{4}$$

Für $r_o = \infty$ wird $u = 1$. Gleichung (4) zeigt, *dass u von den axialen Feldstärken unabhängig ist.*

Ist die *Beanspruchung unsymmetrisch,* so wird der Radius, für welchen M, resp. C ein Maximum wird, ein folgender Weise gefunden (Fig. 6):

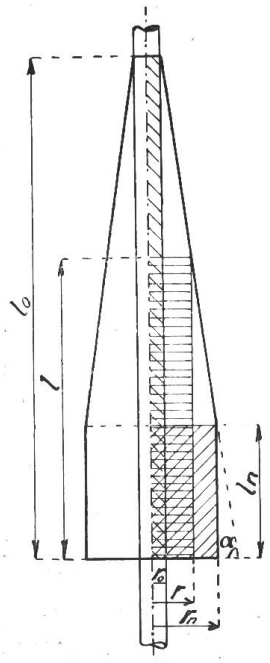

Fig. 6.

$$\frac{l}{l_n} = \frac{r_n - r + \frac{l_n}{tg\,a}}{\frac{l_n}{\mathrm{tg}\,a}} = \frac{r_n - r + \frac{l_n(r_n - r_o)}{l_o - l_n}}{\frac{l_o(r_n - r_o)}{l_o - l_n}},$$

$$M = r\,l = \frac{\{(l_o - l_n)(r_n - r)\,r + l_n(r_n - r_o)\,r\}\,l_n}{l_o(r_n - r_o)}$$

wird M nach r differenziert und die Ableitung gleich Null gesetzt, so ergibt sich der Radius r, für welchen M ein Maximum wird, zu:

$$r = \frac{1}{2}\left\{\frac{(r_n l_o - r_o l_n)}{l_o - l_n}\right\}. \tag{5}$$

Der Flächeninhalt des Rechteckes über diesem Radius wird durch Rechteck I oder II (durch das kleinere) dividiert, um u zu bekommen.

Zur Schichtenbildung wird der Radius beliebig in kleine Teile, am besten in gleiche Teile, unterteilt. Die Dicke der Schichten spielt vor allem insofern eine Rolle, als axialer und radialer Spannungsgradient in Nähe der Stanniolränder ihnen proportional sind.

b) Berechnung unter Annahme von Schichten endlicher Dicke d.

Diese Berechnungsart ist namentlich dann anzuwenden, wenn die Gesamtdicke nur in wenige Teilschichten unterteilt wird. Aber auch dann kann zweckmässig zunächst mit Gleichung (2) rasch kontrolliert werden, ob das Verhältnis $\frac{l_o}{r_o}$ ein günstiges ist und mit Gleichung (3), ob dabei u in den gewünschten Grenzen bleibt.

Wir machen wieder den Ansatz, dass der dielektrische Widerstand der innersten Schicht gleich demjenigen der äussersten Schicht sei. n = Zahl der Schichten, l_n = Fassungslänge, r_o = Bolzenradius, r_n = Fassungsradius. Für den Hohlzylinder beträgt der dielektrische Widerstand als reziproker Wert der Kapazität:

$$R = \frac{2 \log \frac{r_x}{r_{x-1}}}{\delta l}$$

l = Zylinderlänge.

Δl = Differenz der Längen zweier benachbarter leitenter Einlagen.

$$= \frac{\log \frac{r_1}{r_o}}{l_1} = \frac{\log \frac{r_n}{r_{n-1}}}{l_n}.$$

$l_1 = l_n + (n-1)\,\Delta l$. Dies eingesetzt ergibt nach einiger Umformung:

$$\text{Fassungslänge } l_n = (n-1)\,\Delta l \left\{ \frac{\log \frac{r_n}{r_{n-1}}}{\log \frac{r_1}{r_o} \frac{r_{n-1}}{r_n}} \right\}. \tag{6}$$

Für diese Fassungslänge ist die Beanspruchung der äussersten Schicht gleich derjenigen der innersten, u ist für den gewählten Bolzendurchmesser ein Minimum.

In (6) ist $r_n = r_o + \frac{V_p}{H_r}$.

V_p = Prüfspannung.

H_r = Mittlere radiale Feldstärke bei Prüfspannung.

$$u = \frac{R_{max}}{R_{min}} = \frac{\log \frac{r_1}{r_o}}{\log \frac{r_m + \frac{d}{2}}{r_m - \frac{d}{2}}} \; \frac{l_n + \left(\frac{n-1}{2}\right) \Delta l}{l_n + (n-1)\,\Delta l}.$$

d = Dicke einer Schicht.

$$r_m = r_o + \frac{r_n - r_o}{2}.$$

$$u = \frac{2 l_n + (n-1)\,\Delta l}{2 l_n + (n-1)\,2 \Delta l} \; \frac{\log \frac{r_1}{r_o}}{\log \frac{r_m + \frac{d}{2}}{r_m - \frac{d}{2}}}. \tag{7}$$

Setzt man in Gleichung (6) zur Abkürzung:

$$\left\{ \frac{\log \frac{r_n}{r_{n-1}}}{\log \frac{r_1}{r_o} \frac{r_{n-1}}{r_n}} \right\} = a$$

und eliminiert l_n in Gleichung (7) mit Hilfe von (6), so wird:

$$u = \frac{2(n-1)\,\Delta l\, a + (n-1)\,\Delta l}{2(n-1)\,\Delta l\, a + (n-1)\,2\Delta l} \; \frac{\log \frac{r_1}{r_0}}{\log \frac{r_m + \frac{d}{2}}{r_m - \frac{d}{2}}},$$

$$u = \frac{2a+1}{2a+2} \; \frac{\log \frac{r_1}{r_0}}{\log \frac{r_m + \frac{d}{2}}{r_m - \frac{d}{2}}}. \tag{8}$$

Soll die elektrische Beanspruchung nicht symmetrisch auf die Mittelschicht verteilt werden, so muss die Fassungslänge verändert werden. Eine Verlängerung bewirkt eine Entlastung in den äussersten Schichten, eine Verkürzung führt zu stärkerer Belastung. u wird grösser, und zwar umso mehr, je unsymmetrischer die Klemme beansprucht wird. Die minimal beanspruchte Schicht rückt von der Mitte gegen die weniger beanspruchten Abteilungen hin. Um u zu finden, wird der dielektrische Widerstand der höchst beanspruchten Schicht ermittelt, ferner derjenige der wenigst beanspruchten Schicht, die man unter Berücksichtigung des Gesagten leicht findet.

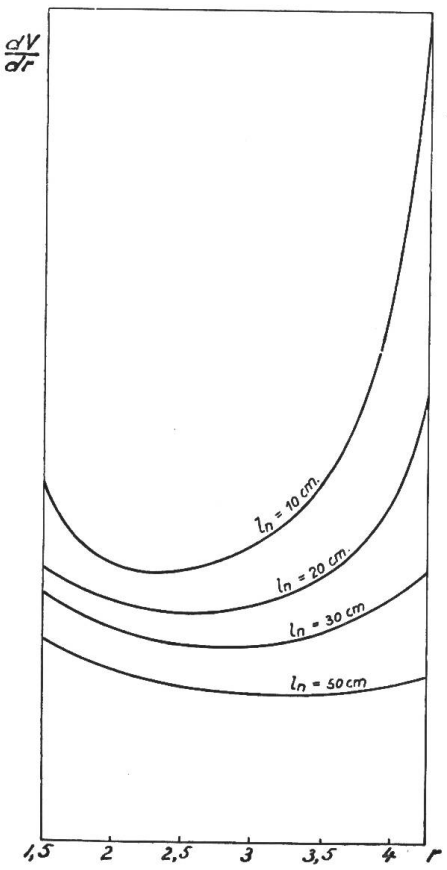

Fig. 7.

In Fig. 7 ist die Feldstärke in Funktion des Klemmenradius für einige verschiedene Fassungslängen aufgetragen, die von der soeben berechneten günstigsten abweichen, um den Einfluss der Würdigung einer richtigen Dimensionierung zu veranschaulichen. Die Ordinatenmasstäbe der 4 Klemmen sind verschieden gewählt, um die Linien auseinander zu halten. Bei gleichen Masstäben wären die unter den Kurven liegenden Flächen $\int_{r=1,5}^{r=4,5} \frac{dV}{dr}\, dr$ einander gleich.

In Fig. 8 ist u für eine 64 kV-Klemme in Funktion des gewählten Bolzenradius aufgetragen, wobei stets die günstigste der möglichen Fassungslängen vorausgesetzt ist. Die Fassungslängen sind ebenfalls eingezeichnet. Praktische Anforderungen verbieten oft die günstigsten Dimensionen wirklich zu wählen, aber eine Annäherung ist stets möglich.

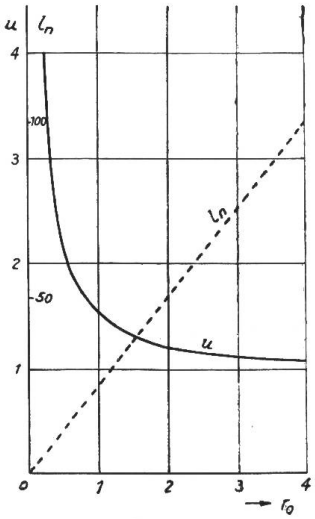

Fig. 8.

Berechnungsbeispiel zu b:

Man ermittle die Dimensionen zu einer Deckeldurchführung für 150 kV Betriebsspannung unter Annahme folgender Beanspruchungen:

$H_r = 45$ kV/cm; $H_L = 2{,}9$ kV/cm; $H_u = 6{,}0$ kV/cm.

Prüfspannung (nach S. E. V.-Normalien): $V_r = 2 \times 150 + 10 = 310$ kV.

Gewählter Bolzendurchmesser: $2\,r_o = 5{,}0$ cm, gewählte Schichtdicke $= 0{,}4$ cm.

Hartpapierstärke $= \frac{310}{45} = 6{,}9$ cm; Anzahl der Schichten $= \frac{69}{4} \cong 17$.

Länge Oberteil (Luft) $= \frac{310}{2{,}9} = 107$ cm; Abstufung $= \frac{107}{17} = 6{,}3$ cm.

Länge Unterteil (Oel) $= \frac{310}{6} = 51$ cm; Abstufung $= \frac{51}{17} = 3$ cm.

$n = 17$; $n-1 = 16$; $r_n = 2{,}5 + 6{,}8 = 9{,}3$ cm; $r_{n-1} = 9{,}3 - 0{,}4 = 8{,}9$ cm.

$r_o = 2{,}5$ cm; $r_1 = 2{,}5 + 0{,}4 = 2{,}9$ cm; $\Delta l = 6{,}3 + 3{,}0 = 9{,}3$ cm.

Fassungslänge:
$$l_n = (n-1)\,\Delta l \left\{ \frac{\log \frac{r_n}{r_{n-1}}}{\log \frac{r_1}{r_o} \frac{r_{n-1}}{r_n}} \right\}$$

$$= 16 \times 9{,}3 \left\{ \frac{\log \frac{9{,}3}{8{,}9}}{\log \frac{2{,}9}{2{,}5} \frac{8{,}9}{9{,}3}} \right\} = 62{,}8 \text{ cm.}$$

$$a = \frac{\log \frac{r_n}{r_{n-1}}}{\log \frac{r_1}{r_o} \frac{r_{n-1}}{r_n}} = 0{,}422\,.$$

Ungleichmässigkeitsgrad
$$u = \frac{(2a+1) \log \frac{r_1}{r_o}}{(2a+2) \log \frac{r_m + \frac{d}{2}}{r_m - \frac{d}{2}}},$$

worin: $r_m = 3{,}4 + 2{,}5 = 5{,}9$ cm.

$$u = \frac{0{,}844 + 1}{0{,}844 + 2} \frac{\log \frac{2{,}9}{2{,}5}}{\log \frac{6{,}1}{5{,}7}} = 1{,}43.$$

In Fig. 9 ist die so berechnete Klemme dargestellt (indessen keine Konstruktionszeichnung), wobei der Deutlichkeit wegen in der links stehenden Figur die Durchmessermasse in doppelt so grossem Masstab wie die Axialmasse gezeichnet sind. Die Ansicht rechts zeigt die wirklichen Proportionen.

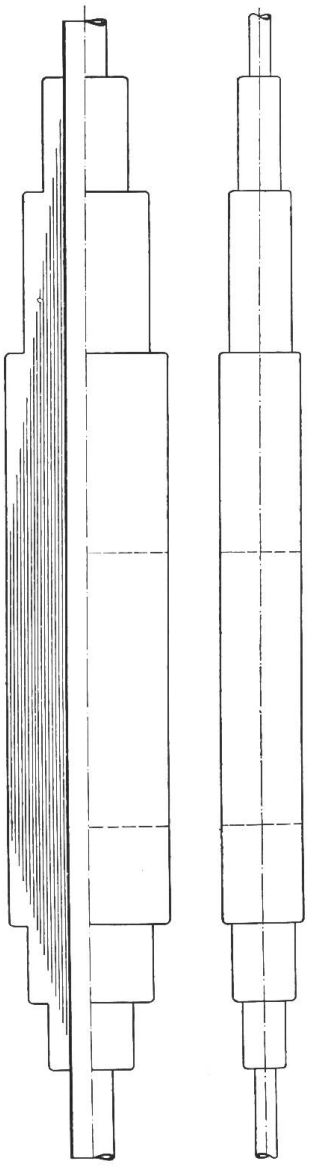

Fig. 9.

2. Berechnung auf gleichmässige axiale Beanspruchung bei Verwendung von Schichten ungleicher Dicke.

Diese Methode führt zu kleinsten Dimensionen. Sie ergibt entweder Schichten ungleicher Dicke bei Stufen gleicher Länge, oder bei gleicher Schichtdicken Stufen ungleicher Länge. Die Praxis zieht meist die Wahl gleicher Stufen vor. Jede Schicht besitzt gleichen dielektrischen Widerstand, auf jede Schicht fällt dieselbe Spannung. Die dünnsten und somit am stärksten beanspruchten Schichten liegen zu innerst und zu äusserst. Wieder wird der Ungleichmässigkeitsgrad ein Minimum, wenn äusserste und innerste Schicht gleich beansprucht wird.

Bezeichnungen:

x_o = Radius des Bolzens;
x_1 = Radius des innersten (1.) Stanniolbelages;
x_2 = Radius des 2. Stanniolbelages;
x_n = Radius des n^{ten} Stanniolbelages (also der Fassung);
l_1 = Länge des innersten Belages;
l_n = Länge des äussersten Belages (also der Fassung);
c = Konstante.

Die dielektrischen Widerstände aller Schichten sollen einander gleich sein:

$$\frac{\log \frac{x_1}{x_o}}{l_1} = \frac{\log \frac{x_2}{x_1}}{l_2} = \frac{\log \frac{x_3}{x_2}}{l_3} \ldots\ldots = c.$$

$$\begin{array}{l|l}
\frac{x_1}{x_o} = e^{c l_1} & x_1 = x_o\, e^{c l_1}, \\
\frac{x_2}{x_1} = e^{c l_2} & x_2 = x_1\, e^{c l_2} = x_o\, e^{c(l_1 + l_2)}, \\
\frac{x_3}{x_2} = e^{c l_2} & \ldots\ldots\ldots\ldots \\
\frac{x_n}{x_{n-1}} = e^{c l_n} & x_n = x_o\, e^{c(l_1 + l_2 + \ldots + l_n)} = x_o\, e^{c l} \\
\hline
 & \frac{x_n}{x_o} = e^{c l}; \quad c = \frac{\log x_n - \log x_o}{l} = \operatorname{tg} \alpha, \text{ worin } l = \frac{l_1 + l_n}{2} n = \sum_1^n l_n.
\end{array} \qquad (9)$$

Trägt man auf logarithmischem Papier (Fig. 10) mit linearer x-Teilung und logarithmischer y-Teilung[5]) auf der x-Axe $\sum l$ ab:

$$\sum_1 l = l_1; \quad \sum_2 l = l_1 + l_2; \quad \sum_3 l = l_1 + l_2 + l_3 \ldots.$$

auf der Ordinate durch den Nullpunkt x_o [im logarithmischen Masstab], auf der Ordinate durch $\sum_n l = l_1 + l_2 + \ldots\ldots + l_n$ den Fassungsradius x_n, so erfüllt die Verbindungsgerade der so erhaltenen Punkte die Gleichung (9). Auf den Ordinaten sind die Werte x_n direkt ablesbar. Man verwende logarithmisches Papier mit möglichst grossem Masstabe. Die Fassungslänge l_n ist zu berechnen nach Gleichung (2),

[5]) Z. B. von Carl Schleich & Schüll, Düren, No. 367.

worin n so zu wählen ist, dass die mittlere Schichtdicke den gewollten Betrag (3 bis 4 mm) annimmt.

In Fig. 11 ist eine so mit gleichen Annahmen wie in Fig. 9 berechnete Klemme dargestellt.

Der radiale Ungleichmässigkeitsgrad u ergibt sich aus dieser Berechnungsmethode sehr einfach als $u = \frac{\text{grösste Schichtdicke}}{\text{kleinste Schichtdicke}}$. Der kleinste Ungleichmässigkeitsgrad kann eingestellt werden durch Verschiebung der Geraden $x_0 - x_n$, bis innerste und äusserste Schicht gleich dick sind.

Der axiale Spannungsgradient auf der Oberfläche stimmt mit dem durch Rechnung gefundenen nicht mehr ganz überein, da die leitenden Einlagen meist nicht

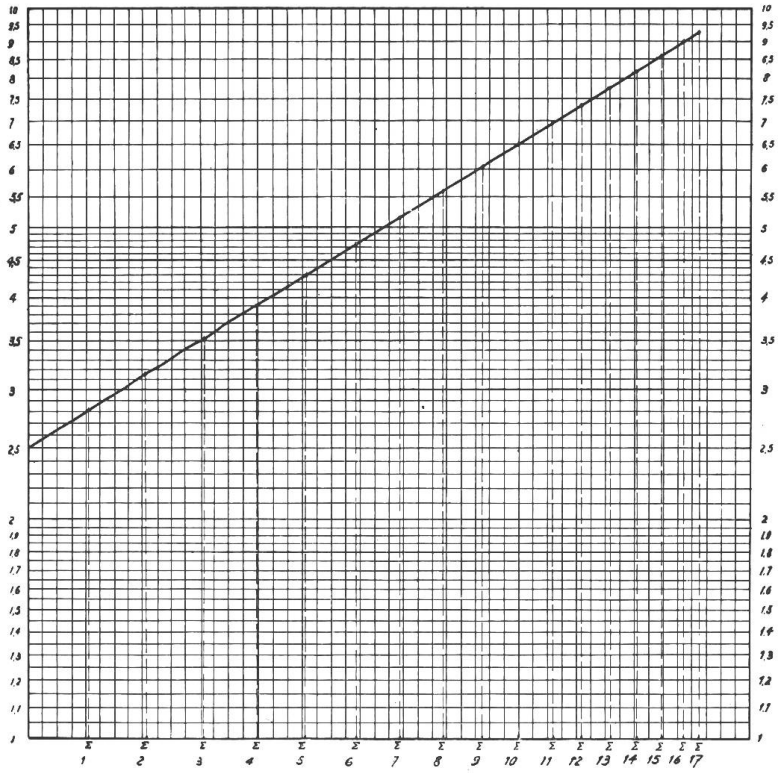

Fig. 10.

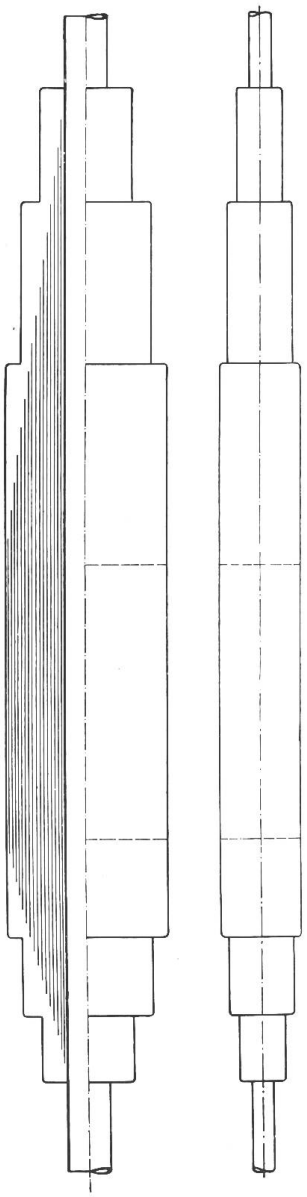

Fig. 11.

bis an die Oberfläche geführt werden. Mitbestimmend auf den Oberflächengradient ist die äussere Begrenzungslinie, die Form der Fassungs- und der Kopfarmatur. Um über diese Einflüsse Aufschluss zu bekommen, leistet die Konstruktion der Kraftlinienbilder nach demselben Verfahren, wie es Kuhlmann[6]) für Durchführungen mit ungesteuertem Dielektrikum eingeführt hat, gute Dienste. Darnach konnten allgemeine Regeln für zweckmässige Korrekturen an den Einlagen gewonnen werden.

[6]) Archiv für Elektrotechnik III. Bd. 1915. 8./9. Heft.