

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 5 (1914)
Heft: 9

Artikel: Theorie und Berechnung der Spannungswandler [Fortsetzung]
Autor: Wirz, Emil
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059676>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.04.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon 9571

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den

Verlag: Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei
A.-G., Zürich
Bahnhofstrasse 61, Zürich I (Telephon 6741)

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A.S.E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l'„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Téléphone 9571

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Zurich
Bahnhofstrasse 61, Zurich I (Téléphone 6741)

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A.S.E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

V. Jahrgang
V^e Année

Bulletin No. 9

September
Septembre 1914

Theorie und Berechnung der Spannungswandler.

Von Dr.-Ing. *Emil Wirz*, Burgdorf.

(Fortsetzung.)

b) Streureaktanz und Widerstand, Isolierung der Wicklungen und mittlere Kraftlinienlänge.

In der Arbeit über Stromwandler¹⁵⁾ wurde gezeigt, dass sich die Streureaktanz der Wicklung eines Schenkels aus den Beziehungen bestimmen lässt:

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) für runde Spulen: } x \cong \frac{8,36 k f w_s^2 u_r}{I_s} \left[\frac{\Delta_{sp}}{3} + \frac{\Delta}{2} \right] 10^{-8} \\ \text{b) für rechteckige Spulen: } x \cong \frac{8,36 k f w_s^2 u_e}{I_s} \left[\frac{\Delta_{sp}}{3} + \frac{\Delta}{2} \right] 10^{-8} \end{array} \right\} \dots \dots \dots 30)$$

worin bedeuten: f die Frequenz des Wechselstromes; u_r bzw. u_e der mittlere Umfang der runden bzw. der rechteckigen Spule; I_s die Länge der Wicklung eines Schenkels; w_s die Windungszahl eines Schenkels; Δ_{sp} die Dicke einer Spule; Δ die Dicke der Isolierhülse zwischen Primär- und Sekundärwicklung und k ein Faktor, der sich bestimmen lässt aus der Beziehung

$$k \cong \frac{k_1 I_s - 1 + e^{-k_1 I_s}}{k_1 I_s} \quad \text{worin } k_1 = \frac{\pi}{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta}$$

und e die Basis der natürlichen Logarithmen darstellt.

¹⁵⁾ Siehe Theorie und Berechnung der Stromwandler, Bulletin des S. E. V. 1913, Heft 11.

Wie aus diesen Beziehungen Gleichung 30) hervorgeht, ist die Streureaktanz um so grösser, je grösser der mittlere Umfang einer Spule und je kleiner die Wickellänge eines Schenkels ist. Bei einem einmal festgelegten Eisenquerschnitt und Windungszahl kann daher die Streureaktanz durch Aenderung dieser beiden Grössen beliebig geändert werden, sodass sich dadurch praktisch jedes gewünschte Verhältnis $\frac{X}{r}$ erreichen lässt. Die Faktoren

u_r, u_e, Δ_{sp} und I_s lassen sich dann für jede Wicklung, wie weiter unten gezeigt werden soll, mit Hilfe der zulässigen elektrischen Beanspruchung der einzelnen Spulen leicht ermitteln. Die Dicke der Isolierhülse Δ hingegen ist von der Betriebsspannung abhängig und lässt sich nicht mit Bestimmtheit vorausberechnen, sondern muss nach der Erfahrung, die man im Laufe der Zeit an solchen Apparaten gesammelt hat, dimensioniert werden.

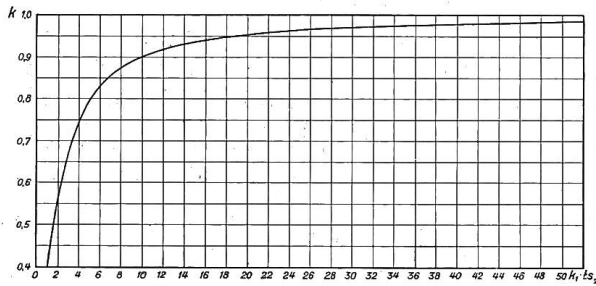


Fig. 16. Kurve für k in Abhängigkeit von $k_1 \cdot I_s$.

Die Berechnung des Faktors k ist für die Praxis etwas umständlich und kann umgangen werden, indem man denselben ein für alle Male als Funktion des Produktes $k_1 \cdot I_s$ festlegt und in Kurvenform aufträgt, wie bereits in der Arbeit über Stromwandler gezeigt wurde. Diese Kurve gilt dann allgemein sowohl für die Primär- als auch für die Sekundärwicklung, Fig. 16.

Zur Bestimmung des Verhältnisses $\frac{X_1}{r_1}$ ist nun noch der effektive Widerstand r_1 der Primärleitung erforderlich. Derselbe lässt sich berechnen aus der Beziehung:

$$r_1 = k_w r_{1g} = k_w \frac{(1 + \alpha T) I_{m1} w_1}{5700 q_1} \dots \dots \dots 31)$$

worin α den Temperaturkoeffizient des Kupfers, T die Temperatur der Spule, q_1 den Drahtquerschnitt in mm^2 und I_{m1} den mittleren Umfang einer Spule bedeutet. Bei Spannungswandlern kann im allgemeinen der Faktor k_w unbedenklich 1 gesetzt werden, da man es hierbei hauptsächlich bei der Primärwicklung mit sehr kleinen Drahtstärken zu tun hat. Für die Sekundärwicklung schwankt er hingegen zwischen den Werten 1 bis ca. 1,05 je nach der Grösse des Spannungswandlertypes, da man hier meistens grössere Drahtquerschnitte zur Anwendung bringt, als es die an den Sekundärklemmen abgegebene Leistung erfordert, um hauptsächlich einen möglichst kleinen Spannungsabfall zu erhalten.

In Gleichung 31) ist die mittlere Windungslänge I_{m1} auch identisch mit dem mittleren Umfang u_{1r} bzw. u_{1e} einer Spule. Zur angenäherten Berechnung desselben kann dann gesetzt werden:

a) Für runde Spulen

$$\left. \begin{aligned} \text{Primärwicklung: } u_{1r} = I_{m1} &\cong \pi \left[D + 2 \left(\Delta_0 + \Delta_2 + \Delta + \frac{\Delta_1}{2} \right) \right] \\ \text{Sekundärwicklung: } u_{2r} = I_{m2r} &\cong \pi [D + 2 \Delta_0 + \Delta_2] \end{aligned} \right\}$$

b) Für rechteckige Spulen:

$$\left. \begin{aligned} \text{Primärwicklung: } u_{1e} = I_{m1e} &\cong 2[A + B] + 2\pi \left[\Delta_0 + \Delta_2 + \Delta + \frac{\Delta_1}{2} \right] \\ \text{Sekundärwicklung: } u_{2e} = I_{m2e} &\cong 2[A + B] + 2\pi \left[\Delta_0 + \frac{\Delta_2}{2} \right] \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 32)$$

worin A und B die Kernquerschnittsdimensionen; D den Durchmesser des Kernkreises und Δ_0 die Stärke der Isolation zwischen Kern und Sekundärwicklung darstellen. In Fällen, wo die Dimensionen der Isolierhülse gegeben sind, lassen sich obige Beziehungen noch vereinfachen, jedoch besitzen diese Vereinfachungen keine allgemeine Gültigkeit.

Bei der Dimensionierung der Wicklungen bilden nun wohl die Wickellänge l_s eines Schenkels und die Dicken der Wicklungen (A_1 und A_2) die wichtigsten Faktoren, da durch sie das Verhältnis $\frac{x_1}{r_1}$ und damit die Güte eines Spannungswandlers beliebig variiert werden kann. Die Abmessungen der Sekundärwicklung spielen jedoch dabei eine untergeordnete Rolle, da diese auf die Hauptabmessungen eines Spannungswandlers keinen wesentlichen Einfluss ausüben, sondern erst bei der Regulierung der Fehler infolge der Belastung in Frage kommen.

Die Dicke der Primärwicklung und die Wickellänge eines Schenkels derselben sind in der Hauptsache von der Höhe der Netzspannung abhängig, für welche der Spannungswandler gebaut werden soll. Hierbei spielt auch noch die Art der Wicklungsanordnung eine wesentliche Rolle, nämlich ob beide Wicklungen nebeneinander in einzelnen Spulen oder übereinander angeordnet sind. Die erstere Art, die sogenannte Scheibenwicklung, kommt in der Regel für Spannungswandler nicht in Frage, da sie für solche Apparate zu teuer würde, obschon sie einige ganz vorzügliche elektrische Eigenschaften besitzt, die für derartige Apparate sehr wertvoll wären.¹⁶⁾ Die letztere Art, die sogenannte Zylinderwicklung hingegen findet sowohl bei der Primärwicklung als auch bei der Sekundärwicklung Anwendung. Da im allgemeinen die Sekundärwicklung für eine bestimmte Spannung ausgeführt wird, meistens für 100 und 110 Volt, seltener 150 Volt und mehr, so wird dieselbe ohne Unterteilungen über die ganze Wickellänge beider Schenkel auf eine oder mehrere Lagen gleichmässig verteilt. Für diese Zylinderwicklung gelten dann dieselben Gesetze für die Wickellänge l_{s2} und die Dicke A_2 , wie sie für die Stromwandlerwicklungen abgeleitet wurden. Bei der Primärwicklung ist es jedoch nicht mehr möglich, dieselbe ohne Unterteilung über die ganze Wickellänge zu verteilen, da sich die einzelnen Lagen gegeneinander nicht mehr mit genügender Sicherheit isolieren liessen, weil die Lagenspannung zu gross würde. Man unterteilt deshalb hier die Zylinderwicklung genau so wie bei der Scheibenwicklung in mehrere Spulen und lässt zwischen zwei Spulen immer einen Zwischenraum zur besseren Isolierung und bei Oeltransformatoren zur Oelzirkulation frei. Bei dieser Art von Wicklungen wird daher besonders für hohe Betriebsspannungen die Wickellänge l_s eines Schenkels sehr gross, da man aus Sicherheitsgründen über eine gewisse Spulendicke nicht hinausgehen darf und wie aus Gleichung 30) hervorgeht, eine Vergrösserung der Spulendicke umgekehrt wieder eine grössere Wickellänge l_s bei derselben Fehlergrenze erfordern würde.

Im Laufe der Jahre hat sich aus den Erfahrungen, die man bei Transformatorenwicklungen gemacht hat, eine gewisse Gesetzmässigkeit über die Dimensionierung der einzelnen Spulen ergeben, die im wesentlichen angibt, bis zu welchen Spulen- und Lagenspannungen man praktisch gehen darf, damit im Betriebe bei normalen Spannungsänderungen die Wicklungen nicht gefährdet werden. Als Lagenspannung hat man hierbei diejenige Spannung zu verstehen, welche normalerweise zwischen dem Anfang der einen Lage und dem Ende der nächsten Lage besteht. Aus dieser Lagenspannung und dem Zwischenraum zweier Spulen lässt sich dann ohne weiteres auch eine zulässige Höchstspannung pro Spule festlegen. Arnold¹⁷⁾ gibt als höchst zulässige Lagenspannung für dünnadrätige Wicklungen 100 Volt und für solche aus dickem Draht mit wenigen Lagen 300 bis 400 Volt an. Für Spannungswandler ist es wohl nicht ratsam, höhere Lagenspannungen als 100 Volt sowohl für die Primär- als auch für die Sekundärwicklung zuzulassen, da sonst leicht bei solchen Hochspannungsnetzen, in welchen häufig Ueberspannungserscheinungen auftreten, die Wicklungen derartiger Apparate stark gefährdet sind. In der Regel wird man die Lagenspannung bei niederen Betriebsspannungen beträchtlich niedriger als 100 Volt wählen, um sie sukzessive mit steigender Betriebsspannung bis auf 100 Volt und gegebenen Falls noch höher zu steigern. Bei Lagenspannungen über 100 Volt sind meistens schon besondere Vorkehrungen zur guten Isolierung erforderlich und sollten deshalb solche Fälle, wenn immer möglich,

¹⁶⁾ Einige Firmen verwenden dieselbe auch für kleinere Spannungswandler, die nach dem Mantelsystem gebaut sind, mit gutem Erfolg.

¹⁷⁾ Arnold, Wechselstromtechnik. Band II. 2. Auflage.

auf abnormale Konstruktionen beschränkt bleiben. Zur Festlegung der Spulenbreite kann folgende Beziehung dienen:

$$E_1 \cong \frac{d P_x 10^8}{2 \cdot 4,44 f B_{\max} q_{ei}} + 2 d_i \dots \dots \dots 33)$$

worin d = Durchmesser des isolierten Drahtes, P_x = Lagenspannung, d_i = Dicke der Isolation auf jeder Seite der Spule (vorstehende Papierzwischenlagen etc.) und q_{ei} den aus Gleichung 26) ermittelten Eisenquerschnitt bedeutet. Die Dicke der Isolation auf beiden Seiten der Spule schwankt zwischen 0 und ca. 4 mm, je nach der Art, wie solche Spulen gewickelt werden. Die Spulenbreite b_1 hängt aber nicht nur allein von der Lagenspannung P_x ab, sondern auch von der Dicke A_1 einer Spule, da, wie schon früher bemerkt wurde, die gesamte Wickellänge eines Schenkels I_s durch das Verhältnis $\frac{x_1}{r_1}$ festgelegt ist.

Dividieren wir Gleichung 30) durch Gleichung 31), so folgt

$$\frac{x_1}{r_1} = \frac{8,36 k f w_1^2 5700 q_1 \left[\frac{A_1}{3} + \frac{d}{2} \right] 10^{-8}}{2 I_{s1} (1 + \alpha T) w_1} = \frac{2,381 k f w_1 q_1 \left[\frac{A_1}{3} + \frac{d}{2} \right] 10^{-4}}{I_{s1} (1 + \alpha T)} \dots \dots 34)$$

da nach früherem die mittlere Windungslänge und der mittlere Umfang einer Spule identisch sind und sich in dieser Beziehung aufheben. Der Faktor k_w ist dabei weggelassen worden, da er für die bei der Primärwicklung zur Verwendung gelangenden Drahtstärken vernachlässigbar klein ist. Bei gegebener Spannung, Leistung und Periodenzahl ist daher das Verhältnis $\frac{x_1}{r_1}$ nur noch von der Dicke der Wicklung A_1 und der Wickellänge I_{s1} abhängig.

Würden wir z. B. die Dicke der Wicklung A_1 vergrössern, so nimmt unter gleichbleibenden Verhältnissen die Wickellänge I_{s1} ab und umgekehrt. Das Verhältnis $\frac{x_1}{r_1}$ kann also durch Aenderungen der Dicke A_1 beliebig geändert werden, sodass es für jeden Spannungswandler möglich sein muss, nach Gleichung 20) die Bedingung

$$\frac{x_1}{r_1} = \frac{b_a}{g_a}$$

und damit die Forderung einer phasenfreien Uebersetzung zu erfüllen.

Diese beliebige Variation von A_1 erleidet jedoch wie die Erfahrung lehrt eine gewisse Einschränkung nach oben hin, da aus Sicherheitsgründen eine gewisse Maximalspannung pro Spule nicht überschritten werden darf, sodass auch für den gewählten Drahtquerschnitt dadurch eine maximale Spulendicke festgelegt ist.

Für normale Spannungswandler, d. h. für solche, an welche keine allzugrossen Anforderungen bezüglich der Fehler und der Leerlaufverluste gestellt werden, kann die Spulenspannung $P_{sp} = 500$ bis 1000 Volt gewählt werden; für solche hingegen, die besonders geringe Fehler und auch geringe Leerlaufverluste aufweisen sollen, ist man gezwungen, mit der Spulenspannung bis auf $P_{sp} = 1500$ Volt und mehr zu gehen. Solch hohe Spulenspannungen erfordern jedoch eine äusserst sorgfältige Isolierung, wenn die Spulen betriebssicher sein sollen und verursachen im allgemeinen grosse Erstellungskosten des ganzen Transformators, trotzdem auf der anderen Seite damit gewisse Materialersparnisse gemacht werden. Ebenso wie bei der Lagenspannung sollte auch hier bei der Spulenspannung die obere Grenze von 1500 Volt nur in ganz besonderen Fällen und unter besonders günstigen Umständen überschritten werden, da alle unsere heutigen Isoliermittel, auch die besten und zuverlässigsten Alterungserscheinungen zeigen und deshalb bei einer allzustarken Beanspruchung derselben verhältnismässig schnell der Zerstörung anheimfallen. Besondere Vorsicht ist in dieser Beziehung bei Oeltransformatoren nötig, da wie neuere Untersuchungen zeigen, alle Transformatorenöle die Alterungserscheinungen besonders bei Papier stark begünstigen, wobei jedenfalls die Randwirkungserscheinungen bei sehr hohen Spannungen ihr möglichstes zum Zerstörungswerk beitragen. Eine weitere Erscheinung, die gegen eine

Erhöhung der Spulenspannung spricht, ist die heute so viel besprochene Ueberspannungserscheinung, welche sich bei derartigen Apparaten nur deshalb so stark bemerkbar macht, weil man mit der Beanspruchung der Spulen ohne Berücksichtigung ihrer Lage bis an die äusserste Grenze gegangen ist. Diese Ueberspannungserscheinungen lassen sich gerade bei Spannungswandlern am einfachsten unschädlich machen, indem die den Anschlussklemmen am nächsten gelegenen Spulen ganz einfach um soviel weniger Kupfer enthalten müssen, als eine drei- bis vierfache Ueberspannungssicherheit mehr Isoliermaterial erfordert.

So z. B. ist die Gefahr eines Durchschlages schon sehr stark vermindert, wenn je die oberste Spule eines jeden Schenkels nur die Hälfte der Windungen der übrigen, die zweitobersten Spulen nur $\frac{3}{4}$ der Windungen u. s. w. erhalten und dafür die Zwischenlagen zwischen zwei Drahtlagen verstärkt werden, da ja bekanntlich bei Ueberspannungserscheinungen die ersten Spulen am stärksten in Mitleidenschaft gezogen werden. Es ist mehrfach versucht worden bei Spannungswandlern die Ueberspannungen durch Kapazitäten, Induktivitäten oder Widerstände auszugleichen, jedoch ist dabei nur ein einwandfreies Resultat zu erreichen, wenn diese Spannungswandler mit den Schutzapparaten zusammen abgeglichen werden, da sonst die Uebersetzungs- und Phasenfehler zu gross würden.¹⁸⁾

Zur Bestimmung der Winkellänge eines Schenkels l_s muss deshalb aus Rücksicht auf alle diese erwähnten Gesichtspunkte für einen möglichst phasenfehlerfreien Spannungswandler von Gleich. 34) ausgegangen werden, indem für eine angenommene Spulendicke und für die der Betriebsspannung entsprechende Isolierhülsendicke zwischen der Primär- und Sekundärwicklung mit Hilfe des Verhältnisses $\frac{b_a}{g_a}$ die entsprechende Wickellänge l_s ermittelt wird. Gleich. 33) dient dann mehr zur Kontrollrechnung, damit bei den gewählten Verhältnissen keine Ueberschreitung der maximalen zulässigen Lagenspannung eintritt und vor allem genügend freier Platz zwischen zwei Spulen zum vornherein gesichert wird. Zu oft wird gerade im letzteren Punkte sehr schwer gesündigt, indem die Abstände zwischen zwei Spulen zu klein genommen oder als Zwischenisolation minderwertiges Isoliermaterial wie Presspan und dergleichen verwendet wird. Bei Spannungswandlern, die im Vakuumofen mit Isoliermasse ausgegossen werden, spielt diese Zwischenisolation keine so wesentliche Rolle mehr, da die sich dazwischen drängende Isoliermasse auch einem verhältnismässig schlechten Isolierstoff eine sehr hohe elektrische Festigkeit verleiht. Bei solchen hingegen, die lediglich für Oelisolierung bestimmt sind, ist besonders bei sehr hohen Betriebsspannungen ein genügender Zwischenraum unerlässlich, um der durch dielektrische Verluste auftretenden Erwärmung der Isolierhülsen genügende Abkühlung zu verschaffen.

Diese letztere Erscheinung, die Erwärmung der Isolierstoffe infolge dielektrischer Verluste scheint gerade bei Spannungswandlern noch nicht im richtigen Masse gewürdigt zu werden, da gerade über die Dimensionierung der Isolierhülsen zwischen der Primär- und Sekundärwicklung wenig bekannt geworden ist und man mehrfach bei Spannungswandlern beobachtet hat, dass trotz sorgfältigem Zusammenbau und unter Verwendung des allerbesten Materials besonders bei höheren Spannungen die Messgenauigkeiten nicht den gehegten Erwartungen entsprachen. Wie hierbei eine genauere Untersuchung solcher Fälle zeigt, liegt der Fehler in den weitaus meisten Fällen in einer unrichtigen Dimensionierung der Isolierhülsen, indem dieselben zu stark dimensioniert und dabei noch aus einem Stück hergestellt sind oder aber zu schwach sind und durch stille Entladungen und vermehrte Randwirkung das Messresultat beeinträchtigen.

Zu dicke Isolierhülsen bergen im allgemeinen zwei Fehlerquellen nach verschiedenen Richtungen hin in sich. In erster Linie nimmt mit zunehmender Dicke die Streuung und damit die Kurzschlussimpedanz des Transformators zu, was sich durch grössere Fehler im

¹⁸⁾ Bei Stromwandlern wurde von H. Gewecke E. T. Z. 1914, Seite 386, Heft 14, die Grössenordnung der parallel zu schaltenden Widerstände angegeben, jedoch können damit nur einwandfreie Resultate erzielt werden, wenn solche Stromwandler mit diesen Widerständen zusammen abgeglichen werden, da sonst zu grosse Fehler auftreten würden. Näheres hierüber folgt in einem späteren Aufsatz in der E. T. Z.

Uebersetzungsverhältnis mit zunehmender Belastung geltend macht und in zweiter Linie wachsen die dielektrischen Verluste mit zunehmender Dicke ganz enorm, die sich hauptsächlich durch eine starke Erwärmung des Isoliermaterials bemerkbar machen und dadurch bei ungenügender Abkühlung ein vorzeitiges Altern beschleunigen.

Alle diese Fehlerquellen infolge der Isolierhülsen können, wie diesbezügliche Versuche zeigen, stark vermindert werden, indem von einer gewissen Dicke der Isolierhülse an dieselbe in zwei oder mehrere ineinander geschobene Hülsen unterteilt wird und zwar derart, dass zwischen jeder ein kleiner Zwischenraum für die Oelzirkulation freibleibt. In diesem Falle kann dann die Gesamtdicke der Hülse schwächer gewählt werden, als wenn sie aus einem Stück bestehen würde, da die Oelzirkulation zwischen den einzelnen Hülsen eine gute Abkühlung bewirkt und vor allem eine allzustarke Ionisation des Zwischenraumes verhindert.

Als Hülsenmaterial verwenden einige Firmen besonders für niedere Spannungen Porzellan, andere einfach aus getränktem Papier gewickelte Hülsen und wieder andere solche mit Mikanitzwischenlagen. Ein grosser Teil der Konstruktionsfirmen wendet sich jedoch heute mit Vorliebe den Hartpapierhülsen zu, die ihrer ausserordentlich grossen mechanischen Festigkeit wegen bevorzugt werden. Papierhülsen mit Mikanitzwischenlagen sind für Oel-isolation und hohe Spannungen nicht besonders zu empfehlen, da sie verhältnismässig schnell altern und mit der Zeit etwas locker werden (wahrscheinlich infolge einer langsamen Zersetzung durch Ionisation und durch auflösen des Bindemittels). Ebenso ist Porzellan infolge seiner geringen mechanischen Festigkeit nicht zu empfehlen, insbesondere weil sich Porzellanhülsen auch nicht genau auf die gewünschten Dimensionen herstellen lassen und für höhere Spannungen verhältnismässig viel Raum beanspruchen. Die Vorzüge von Hartpapierhülsen liegen in der Hauptsache in ihrer ausserordentlich hohen mechanischen Festigkeit und dass dieselben in jeder gewünschten Form und Dicke herstellbar sind. Runde Hülsen besitzen jedoch eine höhere Durchschlagsfestigkeit wie rechteckige, da bei letzteren besonders bei dicken Wandungen die Kanten nicht mehr homogen genug sind und dort infolge stiller Entladungen und Randwirkungen zuerst ein Durchschlag erfolgt. Rechteckige Hülsen müssen daher immer etwas stärker dimensioniert werden wie runde. In Fig. 17 sind die Hülsenstärken für verschiedenes Isoliermaterial als Funktion der Spannung dargestellt.

Kurve 1 gibt die Hülsenstärke für Papierzylinder aus imprägniertem Papier als Funktion der Betriebsspannung an, Kurve 2 und 3 diejenige von Papierzylindern mit verschieden starken Mikanitzwischenlagen und Kurve 4 für rechteckige und Kurve 5 für runde Hartpapierzylinder. Kurve I gibt die Durchschlagsspannung für imprägniertes Papier und Kurve II und III diejenige von Hartpapier als Funktion der Dicke an.

Die Wandstärken der Kurven 1, 2 und 3 entsprechen den Angaben des Vereins deutscher Elektrotechniker und die Kurven 4, 5, I, II und III sind teils aus Versuchsmittelwerten und teils aus den Angaben verschiedener Firmen konstruiert worden.

Werden die Wandstärken solcher Hartpapierzylinder nach Kurve 4 und 5 gewählt, so erhält man folgende Sicherheitsgrade gegen einen Durchschlag bei den Spannungen:

- 100 000 Volt zirka 2,5 fache Sicherheit,
- 50 000 Volt zirka 3 bis 4 fache Sicherheit,
- 25 000 Volt zirka 4 bis 5 fache Sicherheit.

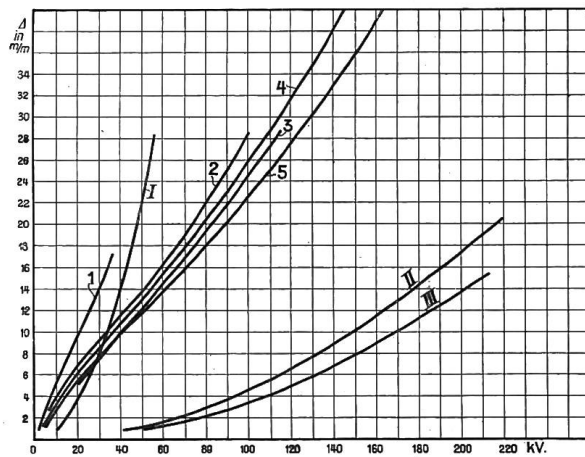


Fig. 17. Hülsenstärke als Funktion der Spannung.

- Kurve 1 für imprägniertes Papier.
- Kurve 2 und 3 Papier mit verschieden starken Mikanitzwischenlagen.
- Kurve 4 Hartpapier und rechteckige Spulen.
- Kurve 5 Hartpapier und runde Spulen.
- Kurve I Durchschlagsspannung für imprägniertes Papier.
- Kurve II und III Durchschlagsspannung für verschiedene Hartpapiersorten.

Da solche Spannungswandler normalerweise bei diesen Betriebsspannungen mit der 1,5 fachen Betriebsspannung geprüft werden müssen, so ist bei sonstiger guter Isolierung der Wicklungen die Zylinderstärke vollkommen ausreichend, vorausgesetzt natürlich, dass die Durchschlagfertigkeit ungefähr den Werten der Kurven II und III entsprechen.

Bis etwa 30 000 Volt Betriebsspannung kann dann unbedenklich die Isolierhülse aus einem Stück bestehen, von 30 000 Volt an aufwärts jedoch sind mehrere ineinander geschobene Zylinder anzuwenden, um, wie oben schon erwähnt, die dielektrischen Verluste bzw. die Erwärmung einerseits zu vermindern und andererseits, um die Kosten solcher Isolierhülsen zu verringern, da mehrere Zylinder von geringer Dicke billiger und zuverlässiger sind, wie ein Zylinder von derselben Gesamtstärke. Als Anhaltspunkte für die Wahl der Dicke der Zylinder kann folgendes dienen:

Für Betriebsspannungen von	1 000—30 000	Volt	1 Hartpapierzylinder	von 1,5—8	mm Stärke
"	"	"	30 000—50 000	" 2	" " 4—6 " "
"	"	"	50 000—70 000	" 3	" " 4—6 " "
"	"	"	70 000—100 000	" 4	" " 4,5—6,5 " "

Für die Wahl der Dicke für anderes Isoliermaterial als Hartpapier liegen natürlich die Verhältnisse wieder anders und müssen von Fall zu Fall auf ähnliche Weise festgelegt werden, jedoch soll hier davon abgesehen werden.

Für die vollständige Konstruktion eines Spannungswandlers sind noch die Abstände der obersten und untersten Spulen eines Schenkels von den betreffenden Jochen von wesentlicher Bedeutung und ebenso die Abstände zwischen den Spulen beider Schenkel, da durch sie die gesamte Schenkel- und Jochlänge und damit die gesamte Kraftlinienlänge im Eisen bestimmt ist. Als Anhaltspunkt zur Festlegung dieser Abstände dient im allgemeinen die Durchschlagsspannung, welche nötig ist, um eine gewisse Strecke in Luft, Oel oder Isoliermasse zu durchschlagen, unter Berücksichtigung der sogenannten Kriecherscheinung längs der Oberfläche des Hülsenrandes. Diese letztere Erscheinung, das Kriechen längs der Oberfläche, gebietet besondere Vorsicht bei der Festlegung dieser Abstände und verursacht im allgemeinen grössere Dimensionen, als für die betreffende Betriebsspannung allein erforderlich wäre. Aus diesem Grunde ist es nicht zweckmässig, diese Abstände aus der Durchschlagsspannung und einem angenommenen Sicherheitsfaktor festzusetzen, sondern hierbei wird man schneller und besser zum Ziele gelangen, wenn dieselben aus Versuchen oder nach ausgeführten bewährten Transformatoren festgelegt werden. In Fig. 18 sind diese Abstände

in Kurvenform als Funktion der Betriebsspannung für Luft, Oel und Isoliermasse aufgezeichnet, wie sie sich teils aus Versuchen, teils aus ausgeführten Transformatoren und nach Angaben von Konstruktionsfirmen¹⁹⁾ ergeben. Bei diesen Kurven ist zu beachten, dass sich diese zulässigen Abstände lediglich nur auf die entsprechende Betriebsspannung beziehen, nicht aber etwa vorkommende Ueberspannungen berücksichtigen und auch nicht dauernd die meist vielfach höhere Prüfspannung vertragen können. Wenn deshalb ein Spannungswandler nur kurze Zeit oder dauernd eine höhere als die normale Spannung vertragen soll, so muss dementsprechend ein höherer Hülsenrand gewählt werden. Da in der Regel bei Spannungswandlern für höhere Betriebsspannungen beide Schenkel des Eisenkernes bewickelt werden

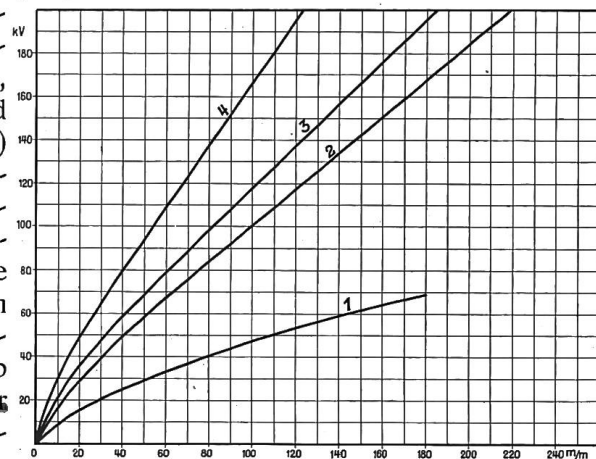


Fig. 18. Zulässiger Hülsenrand als Funktion der Spannung.

Kurve 1 für Luft.
 Kurve 2 für Oel und Masse von ca. 7900 Volt/mm Durchschlagsspannung.
 Kurve 3 für Masse mit 10000 Volt/mm Durchschlagsspannung.
 Kurve 4 für Masse mit ca. 15000 Volt/mm Durchschlagsspannung.

¹⁹⁾ Die Kurven für Oel und Luft stammen aus der Maschinenfabrik Oerlikon, siehe auch Arnold, Wechselstromtechnik Bd. II, S. 231.

und sich dadurch die Betriebsspannung gleichmässig auf beide Schenkel verteilt, ist es nicht unbedingt notwendig, dass der obere und der untere Abstand der Spulen vom Joch gleich gross sind, da meistens auf der unteren Seite beide Spulengruppen miteinander verbunden werden und dadurch die Spannung gegen Eisen nur halb so gross wie auf der oberen Seite ist. In den meisten Fällen wird auf der unteren Seite ein Abstand von $\frac{3}{4}$ tel des oberen genügen. Eine Reduktion auf die Hälfte ist nicht ratsam, da die Potentialverteilung nicht genau im Verhältnis 1 : 2 stattfindet und infolge der Ladungserscheinungen besonders bei höheren Betriebsspannungen gelegentlich auf der unteren Schenkelseite Potentialwerte bis zur Höhe der Netzspannung auftreten können. Zur Festlegung des Abstandes zwischen den Spulen beider Schenkel in der Fensteröffnung sind dieselben Gesichtspunkte wie für den Hülsenrand massgebend, nur dass hierbei die Kriecherscheinungen mehr oder weniger wegfallen, da der Zwischenraum in der Regel offen gelassen wird und nur in Spezialfällen, z. B. bei äusserst gedrängter Bauart, eine isolierende Zwischenwand eingesetzt werden muss. Werden Zwischenwände eingesetzt, so ist natürlich für die Dicke derselben in erster Linie die Durchschlagsspannung des betreffenden Isoliermaterials massgebend. Für Fensteröffnungen ohne Zwischenwände ergeben sich aus den Durchschlagsspannungen für Luft, Oel und Isoliermasse ungefähr die in Fig. 19 aufgezeichneten zulässigen Minimalabstände, die teils aus Versuchen und teils aus der Durchschlagsfestigkeit unter Berücksichtigung eines zulässigen Sicherheitsfaktors ermittelt wurden. Mit diesen Angaben über die Dimensionierung der Spannungswandler kann nun ohne weiteres ein Spannungswandler berechnet werden.

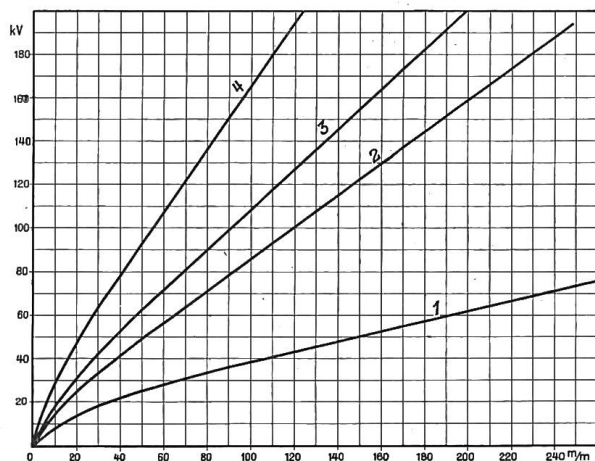


Fig. 19. Zulässige Minimalabstände zwischen den Spulen beider Schenkel.

- Kurve 1 für Luft ohne Zwischenwand.
 Kurve 2 für Oel und Masse gleicher Durchschlagsspannung ca. 7900 Volt/mm.
 Kurve 3 für Masse von 10000 Volt/mm Durchschlagsspannung.
 Kurve 4 für Masse von 15000 Volt/mm Durchschlagsspannung.

Im Nachfolgenden soll an einem Berechnungsbeispiel der Gang der Berechnung gezeigt werden.

(Schluss folgt in No. 10.)



Errata.

Zum Bericht über die Diskussionsversammlung des S. E. V. vom 7. Juni, (Ueberspannungen und Ueberspannungsschutz), Bulletin No. 7, schreibt uns Herr Ing. Bäschlin, Winterthur:

„In Ihrem Bericht über die Diskussionsversammlung des S. E. V. vom 7. Juni im Bulletin No. 7 lfd. Jahres schreiben Sie:

„Bäschlin erwähnt Versuche an Kondensatoren der Firma Meirowsky, bei der einzelne Konstruktionen bis 200 000 Volt während 3 Minuten ohne Schaden zu nehmen, beansprucht waren.“

„Die Bemerkung ist in der von Ihnen veröffentlichten Form nicht richtig. Ich habe nämlich erklärt, dass die Firma Meirowsky & Co. Kondensatorenbatterien gebaut habe für Prüfspannungen bis 220 000 Volt pro Element und dass obige Prüfspannung während 3 Minuten ununterbrochen zur Anwendung gelangt sei, ohne dass die geringste auffällige Erscheinung hätte beobachtet werden können. Auch handelt es sich bei diesen Kondensatoren keineswegs um Versuche seitens der Erstellerin; diese sind schon längere Zeit vorher zum Abschluss gelangt.“

Wir bringen hiermit die Richtigstellung zur Kenntnis.

Das Generalsekretariat.