

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 22 (1931)
Heft: 11

Artikel: Pressgas als Isolation in Hochspannungsapparaten
Autor: Bölsterli, A.A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060515>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXII. Jahrgang

N^o 11

Mittwoch, 27. Mai 1931

Pressgas als Isolation in Hochspannungsapparaten.

Von A. A. Bölsterli, Dipl.-Ing., New Haven, Conn. (U.S.A.).

621.315.618

Der Autor bespricht die Möglichkeit, Hochspannungsapparate statt mit Öl mit Gasen unter hohem Druck zu isolieren. Anhand von Versuchsergebnissen und theoretischen Erörterungen macht er Angaben über die elektrischen und wärmetechnischen Eigenschaften verschiedener für diesen Zweck in Frage kommender Gase unter Druck (Wasserstoff, Kohlensäure, Stickstoff, Helium) und vergleicht sie mit den entsprechenden Eigenschaften des Öles. Es hat sich gezeigt, dass sich besonders Stickstoff und Stickstoffmischungen eignen. Das Kernproblem, Pressgasapparate zu bauen (es sind solche, allerdings in industriell unbrauchbarer Ausführung, schon seit mehr als 25 Jahren bekannt), besteht in der Abdichtung der Kessel, besonders der Durchführungen. Dieses Problem wird erörtert und seine Lösung angegeben. Vor 12 Jahren hergestellte Probedurchführungen zeigen noch heute keinen Druckverlust.

Der Autor beschreibt sodann Pressgas-Kondensatoren, -Transformatoren und -Messwandler und untersucht deren Verhalten bei Störungen. Im allgemeinen werden die Pressgasapparate vollständig hermetisch abgeschlossen, so dass sie den Druck von ca. 17 bis 20 at absolut während 20 und mehr Jahren ohne Verlust beibehalten. Nur in besonderen Fällen werden die Kessel an eine Druckanlage angeschlossen, welche den Gasdruck aufrechterhalten muss. Pressgasapparate können infolge der hervorragenden elektrischen Eigenschaften (elektrische Festigkeit, dielektrische Verluste) der Gase unter Druck wesentlich kleiner und leichter, Messtransformatoren überdies mit höherer Genauigkeit gebaut werden als Apparate in Öl und besitzen die Nachteile, welche ölgefüllten Apparaten anhaften, nicht.

L'auteur expose la possibilité d'utiliser, à la place d'huile, des gaz soumis à une forte pression pour l'isolement de l'appareillage électrique à haute tension. Des résultats d'essais et des considérations théoriques lui permettent de faire des données sur les propriétés électriques et thermiques de différents gaz sous pression qui entrent en considération pour le but cherché (hydrogène, acide carbonique, azote, hélium) et de les comparer aux propriétés correspondantes de l'huile. On a trouvé que l'azote et les mélanges à base d'azote s'y prêtent tout spécialement. Le problème fondamental de la construction d'appareils à gaz comprimé — on en connaît déjà depuis plus de 25 ans, mais qui sont inutilisables industriellement — consiste à rendre les récipients étanches, spécialement les traversées. L'auteur explique ce problème et en donne une solution. Des traversées d'essai, construites il y a plus de 12 ans, ne décèlent à l'heure actuelle encore aucune perte de pression.

L'auteur décrit ensuite quelques types de condensateurs, de transformateurs de puissance et de transformateurs de mesure et étudie leur fonctionnement lors de perturbations dans leurs circuits. En général les appareils à gaz comprimés sont hermétiquement clos, de sorte que des pressions de 17 à 20 atmosphères se maintiennent sans aucune perte pendant 20 ans et plus. Dans des cas spéciaux seulement, les appareils sont raccordés à un compresseur qui doit maintenir la pression voulue. En raison des qualités remarquables des gaz comprimés — rigidité diélectrique, pertes diélectriques — on peut réduire sensiblement l'encombrement et le poids des appareils à gaz sous pression et même, pour les transformateurs de mesure en particulier, obtenir une exactitude plus grande que pour les appareils à huile, tout en supprimant les inconvénients inhérents à ces derniers.

I. Allgemeines.

Die Tatsache, dass die elektrische Festigkeit von Luft und Gasen mit dem Druck zunimmt, ist schon lange bekannt. Zu den frühesten Veröffentlichungen gehört wohl die im Jahre 1889 erschienene Arbeit von M. Wolf¹⁾, der Messungen an H₂, O₂, N₂ und CO₂ mit Drucken bis zu 10 at anstellte. Die wichtigsten spätern Arbeiten, die sporadisch erschienen, sind in der Bibliographie am Ende des Aufsatzes angeführt. Es handelt sich fast durchwegs um Versuche bei sehr kleinen Schlagweiten, und es wird mit guter Übereinstimmung gefunden, dass die Durchschlagsspannung bis ca. 10 at proportional mit dem Druck und bei höheren Drucken zunehmend langsamer als der Druck anwächst.

Die Kenntnis dieser interessanten Erscheinung blieb zunächst auf einen engen Kreis von Physikern beschränkt. Aber bereits im Jahre 1904 lenkte in den Vereinigten Staaten von Amerika Prof. Ryan die Aufmerksamkeit des Technikers auf die Möglichkeit, Pressgas als isolierendes Mittel in Transformatoren zu verwenden. Ungefähr zur gleichen Zeit rief die drahtlose Telegraphie, die damals ihre ersten Triumphe feierte, nach hochwertigen Isoliermaterialien, und schon im Jahre 1905 finden wir Fessendens Hochspannungskondensatoren als erstes praktisches Beispiel von Pressgasisolation. Abgesehen von den etwas späteren Pressgaskondensatoren von Wien, verzeichnet die Literatur seit 1905 keinen wesentlichen Fortschritt in der Technik der Pressgasanwendung zu elektrischen Zwecken. Der Grund liegt zweifellos darin, dass die praktischen

¹⁾ M. Wolf, Wiedemanns Annalen, Bd. 37, 1889, S. 306.

Schwierigkeiten der Gefäss- und Durchführungsabdichtungen fast unüberwindlich waren. Ausserdem bot die Oelisololation, trotz ihrer unbestrittenen Mängel, der Hochspannungstechnik ein bequemes und befriedigendes Mittel, das sich zur souveränen Herrschaft in diesem Gebiete aufgeschwungen hat. Demgegenüber bleibt jedoch die Tatsache bestehen, dass komprimierte Gase von ca. 15 at Ueberdruck dem Oel an elektrischer Festigkeit ca. dreifach überlegen und überdies von den genügend bekannten Kaprizen des Oeles in weitgehendem Masse frei sind. Der Anreiz, diese günstigen Eigenschaften nutzbar zu machen, ist daher kein geringer.

Nachdem, wie schon betont, das Dichtungsproblem bisher den Hemmschuh für die Weiterentwicklung darstellte, dürfte es interessieren, zu vernehmen, dass dieses Problem seit einiger Zeit von einer amerikanischen Firma ²⁾ befriedigend gelöst worden ist. Die Lösung wurde zunächst auf Hochspannungstransformatoren angewendet, die zufolge ihres Verwendungszweckes (Sterilisierung von Zerealien) ohne Oel und dennoch in äusserst gedrängter Bauart entworfen werden mussten. Die dabei erzielten Erfolge mit Pressgasisololation führten dazu, dieselbe auch für andere Hochspannungsapparate zu verwenden. So werden seit kurzer Zeit neben Transformatoren auch Kondensatoren für Phasenkompensation gebaut. Im folgenden soll über die Grundlagen des Entwurfes von Hochspannungsapparaten mit Pressgasisololation im Lichte dieser Erfahrungen und im Vergleich mit Oelisololation berichtet werden.

II. Eigenschaften der Pressgasisololation.

1. Wahl des Gases.

Damit ein Gas zu Isolierzwecken verwendbar ist, muss es zunächst eine Anzahl Forderungen chemischer Natur erfüllen. Es darf z. B. die sonstwie in der Konstruktion verwendeten Stoffe nicht angreifen. Aus diesem Grunde scheidet Luft aus, um die Möglichkeit einer Ozonbildung im Glimmstrom auszuschiessen. Aus genau demselben Grunde ist auch Kohlensäure nicht ganz einwandfrei, obwohl damit sehr befriedigende Resultate erzielt wurden. Daneben hat CO_2 noch die Eigenschaft, in porösen Isolierstoffen unter starker Temperaturabhängigkeit adsorbiert zu werden, die sich unter Umständen als starke Schwankung des Gasdruckes unliebsam auswirkt. Eine weitere Forderung ist die der Gefahrlosigkeit. Aus diesem Grunde ist z. B. Wasserstoff nicht unbedenklich, obwohl seine Wärmeeigenschaften einen besonderen Anreiz bieten. Eine Verdünnung desselben mit einem trägen Gase bis unterhalb die Explosionsgrenze, oder besser gesagt, bis unter die Grenze, bei der das Gemisch in Luft brennbar ist, böte einen Ausweg. Dabei geht aber auch die Ueberlegenheit der Wärmeeigenschaften grossenteils verloren. Chemisch und wärmetechnisch ideal ist

Helium, doch teilt es mit Wasserstoff den Nachteil geringer elektrischer Festigkeit. Es kommt deshalb lediglich als Beimischung zu andern Gasen in Frage, wenn man eine Verminderung der Festigkeit im Austausch gegen günstigere Wärmeeigenschaften in Kauf nehmen kann. Als brauchbarstes Gas verbleibt schliesslich Stickstoff, der den genannten Forderungen weitgehend entspricht. Er steht in elektrischer Beziehung mit Luft und Kohlensäure auf ungefähr gleicher Stufe und ist von diesen auch wärmetechnisch nur ganz unerheblich verschieden. Im folgenden soll auf die uns interessierenden Eigenschaften näher eingetreten werden.

2. Elektrische Eigenschaften.

Ueber die Druckabhängigkeit der elektrischen Festigkeit von Gasen gibt das Paschensche Gesetz Auskunft, das aussagt, dass für Plattenelektroden die Durchschlagsspannung nur eine Funktion des Produktes aus Druck und Schlagweite ist. Das Paschensche Gesetz ist ein Spezialfall des allgemeineren Townsendschen Ähnlichkeitsgesetzes, welches eine Beziehung zwischen Gasdruck und den Dimensionen der Elektrodenanordnung wie folgt feststellt: «Werden für eine beliebige Elektrodenanordnung alle Dimensionen im Verhältnis a vergrössert, so ist die Durchschlagsspannung dieselbe, wie wenn die ursprüngliche Anordnung belassen und dafür der Gasdruck a mal grösser gemacht wird.» Beide Gesetze sind durch Laboratoriumsversuche innerhalb beschränkter Druckgrenzen durch eine ganze Anzahl Experimentatoren bestätigt worden. Bei Versuchen unter «technischen» Bedingungen hinsichtlich Reinheit der Gase und Beschaffenheit der Elektrodenoberflächen ergeben sie für Drucke von der Ordnung von 15 at zu hohe Werte der Durchschlagsspannung, wie der Leser aus den weiter unten gegebenen Daten leicht errechnen kann.

Die Elektronentheorie liefert heute noch keine quantitative Handhabe zur Auswertung der Erscheinungen bei hohen Drucken. Qualitativ erklärt sie das Anwachsen der Durchschlagsfestigkeit mit wachsendem Druck dadurch, dass mit zunehmendem Druck die freie Weglänge der Elektronen und Ionen umgekehrt proportional mit dem Druck kleiner wird, so dass eine grössere Feldstärke nötig ist, um ihnen auf dem kürzesten Wege die zur Stossionisation nötige Energie zu erteilen.

Vorläufig ist der Konstrukteur auf die mehr oder weniger rohen Resultate des Versuchsstandes angewiesen. Bei Gas unter hohem Druck sind Versuche ohnehin durch technische Umstände sehr erschwert. Im folgenden sollen typische Resultate bekanntgegeben werden.

In Fig. 1 sind die Durchschlagsspannungen an einer Nadelfunkenstrecke vergleichsweise für Luft bei Normaldruck, für Oel und für Stickstoff bei 17 at absolut in Funktion der Schlagweite dargestellt. Für Oel ist dabei technisch reines Transformatoröl angenommen. Aus der Figur geht die grosse Ueberlegenheit des Preßstickstoffes über

²⁾ Products Protection Corp., New Haven, eine Abteilung der Safety Car Heating and Lighting Co. of New Haven, Conn.

Oel hervor. In Fig. 2 sind die Durchschlagsspannungen einer Zylinderfunkenstrecke (Innenzylinder 25,4 mm $\varnothing$, Aussenzylinder 31,8 mm $\varnothing$) in Stickstoff, Kohlensäure und Helium in Funktion des Gasdruckes dargestellt. Man ersieht daraus, dass

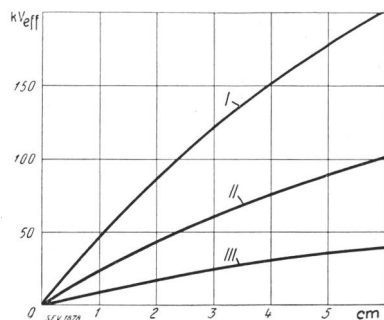


Fig. 1.

Durchschlagsspannung an einer Nadelfunkenstrecke in Funktion der Schlagweite.

- I in Pressgas (N_2) bei 16 at abs.
II in Oel.
III in atmosphärischer Luft bei atmosphärischem Druck.

die Durchschlagsspannung mit wachsendem Druck stetig, wenn auch zunehmend langsamer, anwächst. Auffallend ist die geringe elektrische Festigkeit des Heliums. Mit Oel hat sich mit dieser Zylinderfunkenstrecke eine Durchschlagsspannung von ca. 15 bis 20 kV, also nur etwa ein Drittel derjenigen in Stickstoff von 17 at, ergeben. Aus bekannten geometrischen Beziehungen lässt sich für diese Funkenstrecke die Feldstärke am innern Zylinder für jeden Wert der Durchschlagsspannung berechnen. Aus dem erwähnten Ähnlichkeitsgesetz folgt, dass die so errechneten Durchbruchfeldstärken ebenso wie in Luft keine Konstanten des betreffenden Gaszustandes darstellen, sondern in ähnlicher Weise wie dort von der Elektrodenform abhängen müssen.

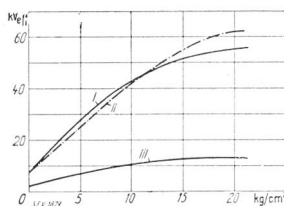


Fig. 2.

Durchschlagsspannung an einer Zylinderfunkenstrecke in Funktion des Gasdruckes.

- I Stickstoff.
II Kohlensäure.
III Helium.
Innenzylinder 25,4 mm $\varnothing$
Aussenzylinder 31,8 mm $\varnothing$
Konzentrische Anordnung.
Oel hat bei Atmosphärendruck in derselben Zylinderfunkenstrecke gemessen eine Durchschlagsspannung von 15 bis 20 kV.

Wenn die Feldstärke an den Elektroden einen gewissen, von Gasdruck und Feldform unabhängigen, kritischen Wert erreicht, so tritt sogenannte kalte Elektronenemission ein, bei der die Elektronen vom Felde aus der Metalloberfläche heraus-

gerissen werden. Damit ist der Zunahme der Durchschlagsfestigkeit mit zunehmendem Druck eine obere Grenze gesetzt. Theoretisch gibt es also für jede Elektrodenanordnung zwei Charakteristiken (Fig. 3). II stellt die konstante Spannung dar, bei welcher die Feldstärke an der Metalloberfläche den genannten kritischen Wert erreicht. I ist die Charakteristik der Stossionisation. Dort, wo sich die beiden schneiden, befindet sich ein kritischer Punkt, charakterisiert durch Druck und Spannung, derart, dass von hier an eine Zunahme des Druckes keine Zunahme der Durchschlagsspannung mehr mit sich bringt. Nach den neuesten Versuchen von Millikan³⁾ (Spitze-Platte in Vakuum, Gleichspannung, mit Spitze als Kathode) ist die kritische Feldstärke bei Nickel ca. 450 kV/cm, bei Platin 235 kV/cm und bei Wolfram 750 kV/cm.

Für die Praxis von grosser Wichtigkeit ist auch das Verhalten gegenüber Stössspannungen, das für Pressgase noch wenig erforscht ist. Verschiedene Forscher (vgl. Schumann, S. 17) melden, dass die Funkenverzögerung bei hohen Drucken erheblich grösser sei als bei Normaldruck. Bei letzterem ist bekanntlich in Luft der Stossfaktor im homogenen Feld ca. 1, im extrem inhomogenen Feld (Spitzenfunkenstrecke) ca. 2. Für Pressgase wären also diese Werte höher anzunehmen. Zum Vergleich sei erwähnt, dass der Stossfaktor für Oel in ziemlicher Unabhängigkeit von der Feldform ungefähr gleich 3 ist. Da der Stossfaktor auch von der Form und Dauer der Stosswelle abhängt, muss beigefügt werden, dass sich die genannten Werte auf Wellen beziehen, wie sie z. B. in den bekannten Untersuchungen von Peek verwendet wurden.

Beim Bau von pressgasisolierten Apparaten kommt man natürlich ohne feste Isolierstoffe nicht ganz aus. Bei Transformatoren dienen sie zur Lagentrennung, bei Kondensatoren zur Distanzierung der Belegungen usw. Ueber das Verhalten in Pressgas gilt folgendes:

Oberflächenentladungen (Kriechentladungen) treten erst bei viel höheren Spannungen auf als in Luft von Normaldruck. Das Verhältnis ist ungefähr dasselbe wie zwischen den entsprechenden Funkenspannungen. Voraussetzung ist natürlich Abwesenheit von Feuchtigkeit.

Die Durchschlagsfestigkeit von undurchdringlichen Stoffen, wie z. B. Glimmer, wird, wie man erwarten würde, nicht beeinflusst. Poröse Stoffe dagegen, wie Papier, Preßspan usw. und auch plastische Stoffe, zeigen eine wesentliche Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit, je nach dem Gasdruck. Bei porösen Stoffen ist dies verständlich, wenn man bedenkt, dass das Gas in die feinsten Poren eindringt und den Stoff gewissermassen «imprägniert». Bei 17 at zeigt sich beispielsweise eine Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit von Papier und Preßspan in Stickstoff auf rund das Zweifache. Wie bei der Imprägnierung mit Oel, zeigt sich auch hier, dass die resultierende Festigkeit grösser ist

Fig. 3.

Durchschlagsspannung in Funktion des Gasdruckes.
I Stossionisationscharakteristik.
II Grenzspannung bestimmt durch diejenige Feldstärke an der Elektrodenoberfläche, bei der die Elektronen aus dem Metall herausgerissen werden.

³⁾ Millikan, Eyring & Mackeown, Physical Review, Vol. 31, 1928, S. 900.

als die des Stoffes allein oder des Gases allein. In welchem Masse der Stossfaktor der Kombination im Vergleich mit dem des festen Stoffes geändert wird, ist noch wenig erforscht. Nach unseren Erfahrungen dürfte er durch die Anwesenheit des Pressgases nicht sehr stark erhöht werden.

Die zerstörende Wirkung der Glimmentladungen in Gegenwart fester Stoffe ist in Gasen wie Stickstoff, Helium oder Wasserstoff ungleich viel schwächer als in Luft.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass auch Transformatorenöl sowie ölprägniertes Papier unter Gasdruck eine erhebliche Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit erfahren. Die Erscheinung ist schon von Kock⁴⁾ erforscht worden. Bei 17 at Druck ergaben eigene Messungen, in Uebereinstimmung mit Kock, eine Erhöhung auf das 2 bis 3fache. Neuere Versuche lassen vermuten, dass es sich um eine Wirkung der im Öl gelösten Gase handelt.

Die *Dielektrizitätskonstante* von Gasen wird durch den Druck so gut wie gar nicht beeinflusst. Sie kann für praktische Zwecke für alle uns interessierenden Gase als eins angenommen werden. Bei gasprägnierten Stoffen ist sie gleich der des Stoffes, ohne Rücksicht auf die Gasart oder den Gasdruck.

Dielektrische Verluste treten in Pressgas keine auf, vorausgesetzt natürlich, dass die Feldstärke überall unterhalb des Wertes liegt, bei dem Glimmen auftritt. Der Verlustwinkel von festen Stoffen, die mit Pressgas imprägniert sind, wird durch die Imprägnation nicht geändert, d. h. er ist gleich dem in Luft oder Vakuum gemessenen. Es soll darüber unter dem Abschnitt «Kondensatoren» näheres berichtet werden.

3. Wärmeeigenschaften.

Aehnlich wie bei der Ölkühlung handelt es sich darum, die Verluste von der Oberfläche des aktiven Teiles zunächst an das Gas, dann vom Gas an die Kesselwandung und schliesslich von der Oberfläche der letztern an die umgebende Luft zu übertragen. Die Uebertragung vom Kessel an die umgebende Luft oder an Kühlwasser soll hier nicht behandelt werden, da sie genügend bekannt ist. Dagegen interessieren die Verhältnisse des innern Wärmeüberganges und es erhebt sich die Frage nach Vergleichswerten. Ebenso wie beim Öl erfolgt der Wärmetransport im Pressgas zum grössten Teil auf dem Wege der Konvektion. Im Pressgas beteiligt sich noch die Wärmestrahlung, sofern die strahlende Oberfläche die Kesselwand «sieht», d. h. keine Zwischenwände, wie sie etwa zur Führung des Kühlstromes verwendet werden, im Wege stehen.

Für die Wärmeübertragung durch Konvektion liegen für Luft bei Atmosphärendruck zahlreiche Untersuchungen vor. Die ihr zugrunde liegenden Gesetze lassen in ihrer allgemeinsten Form Erweiterung auf andere Gase und Drucke zu. Im Anhang ist eine auf den Arbeiten von Lorenz, Rice u. a.

basierende Formel mitgeteilt und in praktisch brauchbare Form gebracht. In vereinfachter Form lautet das Resultat:

$$\text{Konvektion in W/cm}^2 = C \cdot p^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(\Delta t)^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}}$$

wo: p = Gasdruck in at abs.,
 H = Höhe der Wand in cm,
 Δt = Temperaturdifferenz in °C zwischen Oberfläche und Gas bedeutet.

Der Ausdruck gilt für vertikale Flächen. Es folgt daraus, dass die abgeführte Wärme mit der Quadratwurzel aus dem Gasdruck und der 5/4ten Potenz der Temperaturdifferenz wächst. Die Konstante C enthält das Produkt aus spezifischer Wärme bei konstantem Volumen, spezifischem Gewicht und Wärmeleitfähigkeit, und hat für den uns interessierenden Temperaturbereich (0–60°) die in Tabelle I gegebenen angenäherten Werte:

Tabelle I.

	Luft	Stickstoff	Kohlensäure	Helium	Wasserstoff
$C \cdot 10^4$	5,5	5,5	4,7	12,5	14,5

Die Konstante C liefert eine Vergleichszahl für das relative Verhalten der verschiedenen Gase, und es folgt aus obigen Werten, dass die Reihenfolge, an den Werten von C gemessen, die gleiche ist wie die der entsprechenden Wärmeleitzahlen. Dagegen sind die Unterschiede in den Werten C lange nicht so gross wie die der Wärmeleitzahlen. Weiter ist beachtenswert, dass im Gegensatz zur Kühlfähigkeit durch Konvektion, die Wärmeleitfähigkeit vom Gasdruck unabhängig ist, was aus der kinetischen Gastheorie folgt.

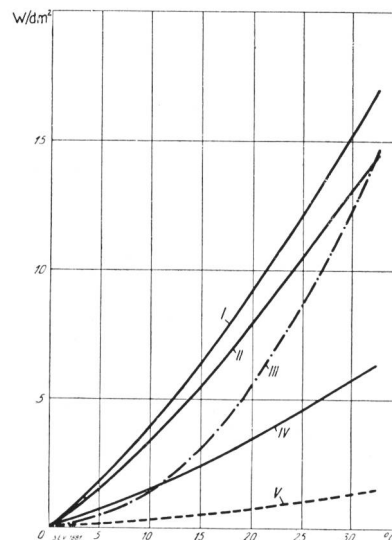


Fig. 4.

Konvektion in Funktion der Temperaturdifferenz in Pressgasen bei 17 at. abs.

- I für Wasserstoff.
- II für Helium.
- III für Stickstoff.
- IV Vergleichswerte für Transformatorenöl.
- V Vergleichswerte für atmosphärische Luft.

Alle Kurven beziehen sich auf eine vertikale Wand von 50 cm Höhe.

⁴⁾ Kock, E. T. Z. 1915, S. 85.

Unter der Annahme eines Druckes von 17 at und einer vertikalen Fläche von 50 cm Höhe sind in Fig. 4 die Wärmeübergangsverhältnisse durch Konvektion für Stickstoff, Helium, Wasserstoff, atmosphärische Luft und Transformatorenöl graphisch dargestellt. Für die Gase ist obige Formel, für Oel die Formel von Vidmar, die für 50 cm Höhe lautet:

$$\text{Konvektion in W/cm}^2 = 0,14 (\Delta t)^2$$

verwendet worden. Aus den Kurven geht hervor, dass bei Temperaturunterschieden von 10° C an Stickstoff eher besser als Oel ist. Helium und Wasserstoff sind dem Oel etwas überlegen, aber mit steigender Temperaturdifferenz in abnehmendem Masse. Praktisch ist das Temperaturgefälle Wand-Gas auf Werte unterhalb 15° C beschränkt, denn es kommt zweimal vor, und darf zusammen mit dem äusseren Temperaturanstieg (Luft-Kesselwand) nicht mehr als etwa 55° C betragen, damit die Höchsttemperaturen das zulässige Mass nicht überschreiten. Es folgt daher, dass für den praktischen Fall die Kühlwertigkeit von Stickstoff bei 17 at abs. von der des Oeles nicht stark verschieden ist, während die von Helium und Wasserstoff erheblich höher ist. Durch Beimischung der letztern Gase zu Stickstoff kann die Kühlwertigkeit beliebig abgestuft werden.

Soweit Messungen vorliegen, scheint es, dass die erwähnte Formel für Gase eher zu hohe Werte ergibt. Dies erklärt sich damit, dass die Formel, streng genommen, für den Fall einer sehr dicken Gasschicht gilt, während bei gasisolierten Apparaten die Kühlkanäle aus Gründen der Raumökonomie eng gehalten werden müssen. An einem kleinen Transformator ausgeführte Versuche ergaben, dass praktisch übereinstimmende Uebertemperaturen erreicht werden konnten, wenn der Kessel mit einer Mischung von Helium und Stickstoff bei 17 at abs. zu gleichen Teilen oder mit Oel gefüllt war.

Im Hinblick auf ganz kurzzeitige Ueberlastungen ist auch die Speicherefähigkeit für Wärme, zum mindesten für Transformatoren, von einiger Bedeutung. Es ist einleuchtend, dass diese bedeutend geringer ist als für Oel. Tabelle II gibt darüber Vergleichszahlen.

Tabelle II.	
Wärmespeicherfähigkeit	Ws pro Liter und °C (bei ca. 20° C)
Luft bei Atmosphärendruck	0,92
Kohlensäure bei 17 at abs.	9,2
Stickstoff bei 17 at abs.	15,2
Helium bei 17 at abs.	14,8
Wasserstoff bei 17 at abs.	21,5
Transformatorenöl	ca. 1600

Es ist daraus ersichtlich, dass sich hinsichtlich kurzzeitiger Ueberlastungen pressgasisolierte Transformatoren zwar etwas besser stellen als luftgekühlte, jedoch bei weitem nicht so günstig wie bei Oelisolation.

III. Das Abdichtungsproblem.

Es ist leicht einzusehen, dass die Brauchbarkeit der Pressgasisolation mit der Beherrschung des Abdichtungsproblems steht und fällt. Ein im Gaskessel versiegelter Apparat soll vollständig dicht sein, derart, dass er den Druck auf unbeschränkte Zeit hinaus unverändert beibehält. Diese Forderung ist von den bisher in der Literatur bekanntgewordenen Apparaten nicht erfüllt worden. Man hat die Abdichtung als befriedigend angesehen, wenn der Druck nicht schon nach ein paar Monaten ganz verschwand. Unter praktischen Betriebsverhältnissen kann ein Druckverlust wegen der dadurch bedingten Gefährdung der Isolation überhaupt nicht geduldet werden. Selbstverständlich würde diese Forderung der Aufrechterhaltung des Druckes auch dadurch erfüllt werden können, dass man eine Druckflasche mit Reduktionsventil mit dem Apparat verbinden würde. Praktisch besteht diese Möglichkeit nur in Anlagen, in denen eine grosse Anzahl gasisolierter Apparate aufgestellt sind, die dann von einer zentralen Stelle aus drucküberwacht werden.

Die Schwierigkeiten der Abdichtung treten hauptsächlich dort auf, wo es sich um Verbindungen zwischen Metall und Isolierstoff handelt, d. h. bei den Durchführungsklemmen. Eine sehr erfolgreiche Lösung ist der eingangs erwähnten Firma gelungen und soll hier kurz beschrieben werden. Die Abdichtung der Verbindungen von Metall zu Metall ist ungleich viel leichter und kann auf verschiedene bekannte Arten bewältigt werden.

Fig. 5 zeigt eine mitten entzwei geschnittene Durchführung für eine Prüfspannung von 150 kV. Das Pressgas umgibt den Durchführungsbolzen und bildet mit dem Durchführungshals eine konzentrische Zylinderfunkenstrecke. Der sonst übliche Unterteil der Durchführung fällt damit weg. Der eigentliche Isolator besteht aus Bakelit und besitzt, da er dem Innendruck von ca. 17 at abs. standhalten muss, erhebliche Wandstärke. Um trotzdem die nötige Homogenität, und damit Festigkeit, zu erreichen, musste zunächst ein besonderes Herstellungsverfahren entwickelt werden, da die nach dem handelsüblichen Verfahren hergestellten Isolatoren versagten. Die Verbindungen des Isolators mit dem Metall der Klemme und des Durchführungshalses sind beide prinzipiell gleich ausge-

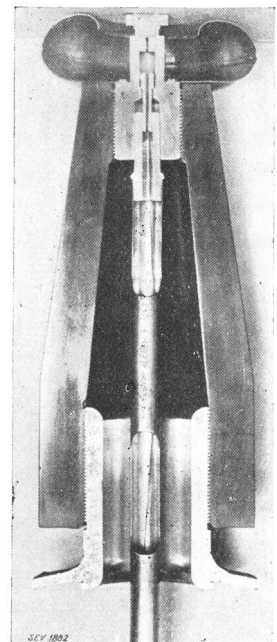


Fig. 5.
Querschnitt durch eine
Pressgas-Durchführung
für eine Prüfspannung
von 150 kV.

bildet und bestehen aus Trapez-Innen- und Aussenwinden, die lose zusammenpassen. Der Zwischenraum wird mit einem organischen, teilweise polymerisierten Zement ausgefüllt, der nach Anwendung durch weitere Polymerisation auf den gewünschten Schmelzpunkt und die gewünschte Plastizität gebracht wird. Die Konstruktion trägt der ungleichen Ausdehnung des Metalls und Bakelites voll Rechnung und liefert bei richtiger Herstellung vollkommene Abdichtung bis zu Temperaturen von 120 bis 150° C. Die ersten Probedurchführungen, die vor ca. 12 Jahren hergestellt und mit Gas gefüllt wurden, zeigen noch heute keinen Druckverlust. Mit Hilfe eines Porzellanmantels können diese Durchführungen in ähnlicher Weise, wie es von Kondensatordurchführungen her bekannt ist, für Freiluftanwendung umgestaltet werden.

In den weiter unten beschriebenen Apparaten sind die Kessel autogen geschweisst und entsprechen den amerikanischen Vorschriften für transportfähige Druckkessel. Durch die bei der autogenen Schweissung entwickelte Hitze bildeten sich an der Innenwand anfänglich Oxydschichten, die abbröckeln und unter Umständen die Isolation gefährden konnten. Um dies zu verhüten, wird heute nach einem patentierten Verfahren der Kessel beim Schweissen mit Stickstoff von geringem Ueberdruck gefüllt, wodurch die Oxydation verhindert wird. Mit elektrischer Schweissung konnten dichte Nähte nicht mit der gleichen Zuverlässigkeit erreicht werden.

Jeder Kessel wird normalerweise mit einem Manometer ausgerüstet, damit eine eventuelle Undichtigkeit sofort ersichtlich wird. Nach einem besonderen Verfahren ist es möglich, den Apparat vor Versand auf Dichtigkeit derart zu prüfen, dass Undichtheiten von solcher Kleinheit, dass es 20 Jahre dauern würde, bis der Druck auf die Hälfte sinken würde, innerhalb weniger Stunden mit Sicherheit nachzuweisen. Ein Kessel, der diese Probe besteht, kann als für unbegrenzte Zeit druckbeständig angesprochen werden.

IV. Kondensatoren mit Pressgasisolation.

Das zum Aufbau eines Kondensators von der Blindleistung P (kVA) notwendige Volumen des aktiven Dielektrikums ist ausser von P nur noch von der Frequenz f , der Dielektrizitätskonstanten (relativ) ϵ , und der Beanspruchung des Dielektrikums (Feldstärke $\mathcal{E}$ in kV/cm) abhängig, und zwar lautet die Beziehung:

$$\text{Volumen in dm}^3 = \frac{1,8 P}{f \cdot \epsilon \mathcal{E}^2} \cdot 10^6$$

Diese Beziehung, die sich leicht aus den Grundgesetzen ableiten lässt, gilt ganz allgemein, gleichgültig, ob es sich um gasförmiges, flüssiges oder festes Dielektrikum handelt. Es erhellt aus ihr die Notwendigkeit, die Beanspruchung so hoch wie möglich zu nehmen, um das Volumen auf ein Mindestmass zu beschränken. Man trifft denn auch in Kondensatoren höhere Beanspruchungen des Iso-

liermaterials, als sie sonst in Hochspannungsapparaten oder selbst Kabeln üblich sind.

Bei sehr hohen Spannungen, bei denen der Abstand der Platten oder Belegungen verhältnismässig gross ist, so dass die unvermeidlichen Ungenauigkeiten in der mechanischen Distanzierung nicht stark ins Gewicht fallen, kommt Pressgas als aktives Medium in Frage. Solche Konstruktionen sind, wie eingangs erwähnt, schon von Fessenden (parallele Platten) und Wien (konzentrische Zylinder) verwendet worden. Da die Dielektrizitätskonstante gleich eins ist, wird das Volumen verhältnismässig gross. Schon aus diesem Grunde ist es vorteilhafter, pressgas-imprägniertes Papier zu verwenden, das gleichzeitig als mechanisches Distanzierungsmittel dient und ohne das man für Spannungen, wie sie z. B. für Kondensatoren zur Leistungsfaktor-Verbesserung in Frage kommen, überhaupt nicht mehr auskommt. Pressgasimprägniertes Papier besitzt eine Dielektrizitätskonstante von 2,5 bis 3,0, so dass das Volumen im Vergleich mit Gas allein sofort auf 33 bis 40 % fällt. Im Vergleich mit ölprägniertem Papier, bei dem man mit einer Dielektrizitätskonstanten von etwa 4 rechnet, ist das Volumen, und damit das Papiergewicht, immer noch ca. 40 % grösser, was genügen würde, um den Gaskondensator konkurrenzunfähig zu machen, wenn nicht ein anderer Umstand zu Hilfe käme. Dieser Umstand liegt im Verhalten

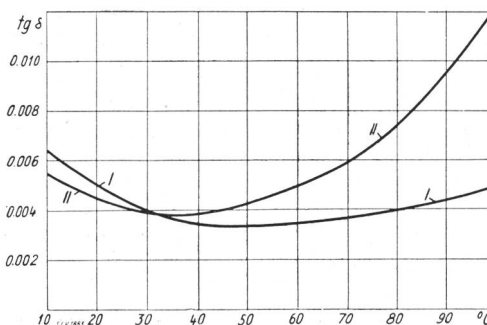


Fig. 6.
Temperaturabhängigkeit (°C) des Verlustwinkels (δ) von Kondensatorpapier.
I Kondensatorpapier gasimprägniert.
II Kondensatorpapier ölprägniert.

der dielektrischen Verluste. In Fig. 6 sind typische Verlustwinkel-Temperatur-Charakteristiken für gasimprägniertes und ölprägniertes Papier dargestellt. Die Minima der beiden Kurven sind nicht stark voneinander verschieden; dagegen steigt der Verlustwinkel beim ölprägnierten Papier von dem bei relativ tiefer Temperatur auftretenden Minimum stark an. Beim gasimprägnierten Papier liegt erstens die Temperatur des Minimums im allgemeinen höher, und zweitens erfolgt der Anstieg mit wachsender Temperatur entweder sehr langsam oder überhaupt nicht. Um die Verluste so klein als möglich zu halten, muss man möglichst nahe am Minimum arbeiten. Dies bedeutet, dass man bei Oelisolation mit niedriger Betriebstemperatur und daher niedriger Ubertemperatur rechnen

muss, während man bei Gasisolation schadlos auf die für Papierisolation üblichen Höchsttemperaturen gehen kann. Bei der erwähnten Verschiedenheit der Dielektrizitätskonstanten ist Gleichheit des Verlustwinkels als entsprechend höherer Wattverlust pro Volumeneinheit bei ölprägniertem Papier zu deuten. Wir haben also folgende Verhältnisse: Um bei Oelprägnation die räumlich stärker konzentrierten Verluste abzuleiten, und dies noch bei einer kleineren zulässigen Uebertemperatur, muss das aktive Volumen stark unterteilt werden, um es allseitig der Kühlwirkung des Oeles auszusetzen. Das totale Volumen und Gewicht des ölsolierten Apparates wird dadurch so sehr vergrößert, dass es trotz der Ersparnis an Papier dasjenige des pressgasisolierten erheblich übertrifft. Diese Tendenz wird noch akzentuiert durch die bei Oelisation übliche Unterteilung der Gesamtleistung in Einheiten von kleiner Leistung. Diese letztere Gepflogenheit hat in den Vereinigten Staaten ihren Grund hauptsächlich in den Vorschriften der Feuerversicherungsgesellschaften, welche derartig in kleine Einheiten unterteilte Kondensatoren nicht als ölgefüllte Apparate behandeln, für welche letztere sehr strenge Regeln bezüglich Aufstellungs-ort usw. gelten. In Fig. 7 sind vergleichende Daten über öl- und pressgasisolierte Kondensatoren dargestellt. Es soll nicht unterlassen werden, darauf hinzuweisen, dass das erwähnte Verhalten der Verlustkurven auch in Hinblick auf die Durchschlagsgefahr von Bedeutung ist. Der Wärmedurchschlag ist bei Pressgasisolation kaum möglich, was mit den bisherigen Erfahrungen sehr gut übereinstimmt.

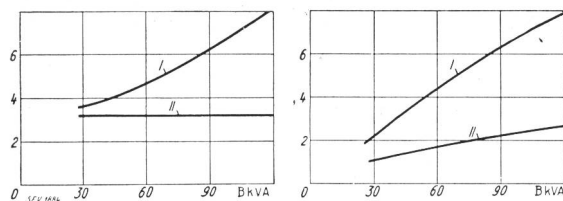


Fig. 7.

Vergleichsdaten für Kondensatoren für 2300 V, 60 p/s.
 a Bodenfläche in Funktion der Leistung.
 b Volumen in Funktion der Leistung.
 I Oelkondensatoren.
 II Pressgaskondensatoren.

Der Aufbau eines gasimprägnierten Kondensators für Leistungsfaktorverbesserung ist aus Fig. 8 ersichtlich. Abwechselnde Lagen von Metallfolien und Papier sind unter Anwendung starker mechanischer Pressung zu einer Säule derart aufgebaut, dass sie den Raum des runden Druckkessels möglichst ausnutzt. Die sich ergebende Oberfläche ist zur Uebertragung der Verlustwärme ohne weiteres ausreichend. Die Gasfüllung besteht aus Stickstoff von 16 at Ueberdruck. Die Abwesenheit von Oel ist in vielen Fällen ein nicht zu unterschätzender Vorteil. Der kompakten, schlanken Form und des geringen Gewichtes wegen eignen sich diese Kondensatoren ganz besonders auch für Montage auf einfachen Masten. Fig. 9 zeigt die Aussenansicht

eines derartigen Kondensators für Freiluftaufstellung. Die maximale Leistung, für welche er heute in einem Kessel gebaut wird, ist ca. 150 kVA Blindleistung bei 2300 V und 60 p/s. Die Verluste be-

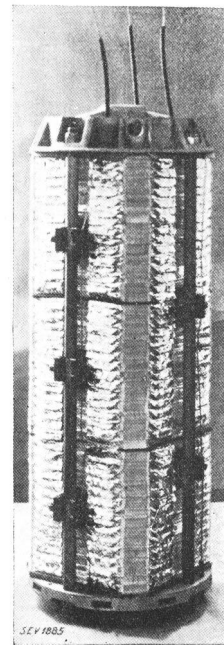


Fig. 8.
 Aktiver Teil eines Pressgaskondensators.
 120 BkVA, 2300 V, 60 p/s.

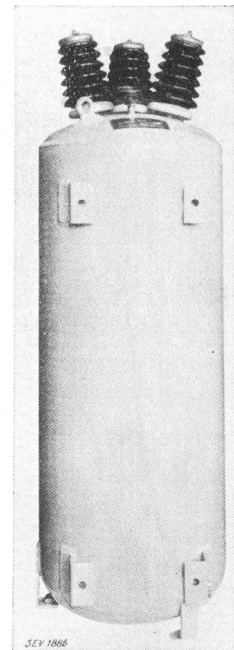


Fig. 9.
 Ansicht eines Pressgaskondensators für Freiluftaufstellung.
 100 BkVA, 4000 V, 60 p/s.

tragen 0,3 bis 0,4 %. Ein Hauptvorteil gegenüber ölprägnierten Kondensatoren liegt darin, dass das Dielektrikum keinerlei chemischen Veränderungen im Laufe der Zeit unterworfen ist. Der Unterhalt ist daher vernachlässigbar und die Lebensdauer unbegrenzt.

V. Transformatoren mit Pressgasisolation.

Da bei Spannungen bis ca. 15 kV die aus mechanischen Gründen nötigen Distanzen ungefähr gleich den elektrisch erforderlichen sind, bietet Pressgasisolation im allgemeinen unterhalb dieser Spannung keinen Vorteil. Je mehr die Spannung dagegen über diesem Werte liegt, um so mehr tritt der Vorteil hervor. Die hohe Raumausnutzung, die einerseits wegen der hohen Isolierfähigkeit des Gases möglich und andererseits im Interesse der Kleinhaltung des Kesselgewichtes geboten ist, führt schon bei relativ kleinen Leistungen zur Unzulänglichkeit der natürlichen Kesseloberfläche. Man muss schon früher als beim Oeltransformator zu künstlichen Mitteln, wie Kühlrohren oder -rippen usw. Zuflucht nehmen. Im allgemeinen ist eine hohe, schlanke Bauart, bei der z. B. die drei Phasen nach der Mantelbauart übereinander liegen, vorteilhaft, da sie geringes Kesselgewicht und maximale Oberfläche ergibt. Während bei kleinen Einheiten der Deckel geschweisst wird, dürfte bei größeren Einheiten, bei denen eine Revision ohne zu

grosse Schwierigkeiten möglich sein sollte, geschraubte Deckelkonstruktion unerlässlich sein. Eine absolute Dichtheit, wie sie bei der Schweissung möglich ist, dürfte dabei praktisch kaum erreicht werden. Bei grossen Einheiten nimmt aber auch das schon erwähnte Mittel zur Aufrechterhaltung des Gasdruckes, nämlich permanente Verbindung einer Druckflasche, praktische Bedeutung an, ganz besonders dann, wenn es sich um eine Anzahl gasisolierter Apparate in einer Unterstation handelt, bei denen die Drucküberwachung und -aufrechterhaltung von einer zentralen Stelle aus erfolgen würde. Bis heute liegen mit grossen Einheiten keine Erfahrungen vor; mit kleineren Einheiten sind sie sehr ermutigend.

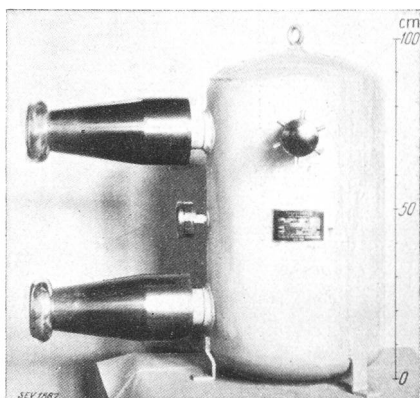


Fig. 10.
Ansicht eines Pressgas-Einphasen-Transformators.
10 kVA, 44 000/220 V, 60 p/s.

Fig. 10 zeigt die Aussenansicht eines Einphasen-Transformators von 10 kVA Leistung bei 44 000/220 V, 60 p/s. Der daneben gezeichnete Maßstab lässt die kleinen Dimensionen erkennen. Fig. 11 stellt einen aus dem Druckkessel gehobenen Einphasentransformator für 150 kV, 720 p/s dar, wie er zur Sterilisierung von Zerealien verwendet wird. Der eine Pol ist geerdet. Unter dem Deckel ist ein Isolierwandler, ebenfalls für 150 kV, ersichtlich, der den 60periodigen Strom für die Antriebsmotoren der rotierenden Elektroden liefert. Die Hochspannungswicklung ist auf konzentrischen Hartpapierzylindern je einlagig angeordnet. Die Leistung beträgt ca. 6 kVA.

VI. Messwandler mit Pressgasisolation.

Messwandler sind innerhalb der für Transformatoren erwähnten Spannungsgrenzen für Pressgasisolation ganz besonders geeignet, da bei ihnen die Leistung gegenüber dem Isolationsproblem ganz zurücktritt.

Bei Spannungswandlern hängen die Systemfehler hauptsächlich von der Streuung ab. Die Streuung ist ihrerseits grösstenteils durch den Abstand und die Verteilung der Wicklungen bedingt, in dem Sinne, dass grosser Abstand grosse Streuung bedingt und umgekehrt. Mit der bei Gasisolation möglichen Reduktion der Abstände nimmt daher

die Genauigkeit des Wandlers zu. Man erreicht also mit einem Schlage kleinere Dimensionen und grössere Genauigkeit bei sonst gleichen Bedingungen.

Bei Stromwandlern sind die Winkel- und Uebersetzungsfehler hauptsächlich von der Wirk- und Blindkomponente des Magnetisierungsstromes ab-

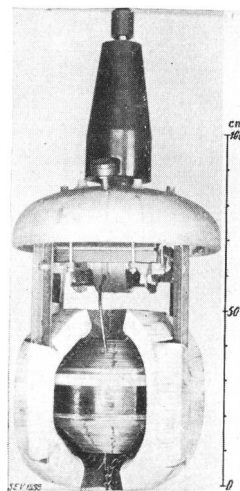


Fig. 11.
Ansicht des aktiven Teiles eines Pressgas-Einphasen-Transformators, 6 kVA, 120 kV, 720 p/s. Ein Pol ist geerdet. Unter dem Deckel ist ein eingebauter Isolierwandler sichtbar.

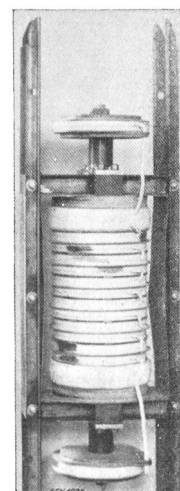


Fig. 12.
Aktiver Teil eines Spannungswandlers für 66 kV, 66 p/s, mit vorgebauten Drosselspulen.

hängig. Je kleiner diese, um so kleiner sind die Fehler. Die kleineren Isolationsabstände bei der Gasisolation ermöglichen eine Kürzung des Eisenweges, und daher bei sonst gleichen Verhältnissen eine Verringerung, nicht nur der Dimensionen, sondern auch der Messfehler. Zum Schutze gegen Ueberspannungen kann eine die Wicklung überbrückende Funkenstrecke in den Gasraum verlegt werden, da eine Verschlechterung der Isolation auch bei häufigstem Ansprechen nicht möglich ist.

In Fig. 12 ist ein Spannungswandler ohne den Kessel abgebildet. Beide Pole sind von Erde für die volle Spannung von 66 kV isoliert und zum Schutz gegen Ueberspannungswellen mit vorgeschalteten Drosselspulen versehen. Im übrigen zeigt die Bauart nichts Ungewöhnliches.

VII. Sicherheitsfragen.

Die Gaskessel werden mit fünffacher Sicherheit gegen den normalen Gasdruck von 17 at abs. gebaut. Der Betriebsdruck schwankt mit der Temperatur nach Massgabe des Ausdehnungskoeffizienten für Gase. Wenn der Druck bei 20° C 17 at abs. beträgt, so wird er beispielsweise bei einer Temperatur des Gases von 80° C auf ca. 20,5 at abs. steigen. Es muss also mit Schwankungen von dieser Grössenordnung gerechnet werden. Damit die Bruchgrenze des Kessels erreicht würde, müsste das

Gas durchwegs eine Temperatur von der Ordnung von 1200° C annehmen. Schon längst bevor diese Temperatur erreicht würde, d. h. bei etwa 150 bis 200° C, erweicht der Dichtungszement in den Fügungsstellen von Isoliermaterial und Metall und lässt das Gas entweichen. Oberhalb 300° C würden auch die Bakelitisolatoren nicht mehr standhalten. Der Gasdruck kann daher die Gefahrgrenze nicht erreichen. Aus diesem Grunde erwächst z. B. bei Brand der Gebäulichkeit, in welchem ein gasisolierter Apparat aufgestellt ist, keine Explosionsgefahr.

Wenn bei einem ölsolierten Apparat innerer Kurzschluss auftritt und die vorgeschalteten Sicherungen oder Schalter nicht funktionieren, so wird im allgemeinen ein Ölbrand entstehen. Was ist bei dieser ungünstigsten Störung bei Pressgasisolation zu erwarten? Wenn der Kurzschlusslichtbogen an die Kesselwand überspringt und ein Loch in diese brennt, entsteht eine sofortige Druckentlastung. Der Kurzschlusslichtbogen kann aber auch im Inneren des organischen Isoliermaterials (bei Kondensatoren) brennen und dieses zersetzen. Dabei ist theoretisch eine Druckerhöhung möglich, die weit über der durch blosse Erwärmung bedingten liegt. Glücklicherweise handelt es sich in solchen Fällen nie um langsame Zersetzung durch einen kleinen Strom. Vielmehr treten bei dieser Störung, die immer die eines direkten Kurzschlusses ist, sehr hohe Ströme auf. Abgesehen von der Erhitzung der Klemme und daherigen Zerstörung der dortigen Dichtung, wird durch den Strom auch ein in den Durchführungsbolzen eingebautes Element aus leicht schmelzbarem Metall entfernt, wodurch eine Öffnung nach aussen freigegeben wird, durch welche sich der Druck nach aussen ausgleicht. Es kann daher auch in diesem denkbar schlimmsten Falle eine Kesselexplosion nicht entstehen. Eventuelle Schäden beschränken sich auf die zerstörende Wirkung des Kurzschlusslichtbogens als solchen, während sekundäre Schäden, wie sie durch Ölbrand entstehen, nicht zu befürchten sind. Es folgt aus dem Gesagten auch, dass ein eigentliches, d. h. auf Druck reagierendes Sicherheitsventil, das erhebliche praktische Schwierigkeiten machen würde, entbehrt werden kann, ohne dass dadurch eine Gefahrenquelle eingeführt wird.

VIII. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Pressgasisolation sind mit den erwähnten Beispielen keineswegs erschöpft. Es sei an elektrostatische Voltmeter erinnert, die sich in Pressgas viel kompender ausbilden lassen als in Luft oder Öl. Ferner ist nicht ausgeschlossen, dass Pressgas als Ölersatz in Schaltern Bedeutung erlangen wird. Die Lösbedingungen eines Wechselstromlichtbogens scheinen z. B. in Preßstickstoff günstige zu sein, obwohl Versuche in grösserem Maßstabe noch nicht vorliegen.

Wie weit sich Pressgas in der Hochspannungstechnik einen Platz zu schaffen vermag, muss die Zukunft lehren. Beachtenswert ist, dass dieses für

gewisse Anwendungen, bei denen enorme Isolierfähigkeit nötig ist, trotz der bis vor kurzem unangetasteten Monopolstellung des Oeles Fuss gefasst hat, nachdem die praktischen Schwierigkeiten, die lange im Wege gestanden hatten, überwunden worden sind.

Literatur.

Elektrische Eigenschaften der Pressgase:

- W. O. Schumann, Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen, Springer, Berlin 1923, Kapitel «Hohe Drucke», Seite 60. Enthält ausführliche Literaturangaben.
- G. Hammershaimb et P. Mercier, Décharge disruptive dans l'azote aux pressions élevées, Archives des Sciences Physique et Naturelles, Genève, Vol. 3, 5^{me} période, 1921, p. 356 et 488.
- Es sei besonders auf die S. 358 und 359 gegebene Zusammenfassung der Resultate früherer Forscher, mit Quellenangaben, verwiesen.
- Die nachfolgend angeführten Arbeiten sind in den obigen Quellen nicht erwähnt, sind aber besonders vom Standpunkte des Technikers aus interessant:
- H. J. Ryan, Some Problems in Electrical Engineering, Sibley Journal of Engineering (Ithaca, N. Y.), Vol. 17, 1904, S. 267.
- do. Compressed Gas as an Insulator, Electric Journal (Pittsburgh), 1905, S. 429.
- do. Open Atmosphere and Oil as High Voltage Insulators, Transact. A. I. E. E., Jan. 1911.
- R. Fessenden, Compressed Air for Condensers, Electrician (London), 1905, S. 429, und E. T. Z. 1905, S. 950.
- W. Voegelé, Abhängigkeit der Durchschlagfeldstärke in Gasen vom Druck, E. T. Z. 1907, S. 578.
- M. Wien, Kondensatoren mit Pressgasisolation, Ann. d. Phys., Bd. 29, 1909, S. 679.
- A. Palm, Neuere Hochspannungsmessgeräte, E. T. Z. 1926, S. 904.

Wärmekonvektion:

- Chester W. Rice, Free Convection in Gases and Liquids II, Transact., A. I. E. E. 1924, S. 131.
- L. Lorenz, Ann. d. Physik, Vol. 13, 1881, S. 586.
- Vidmar, Transformatoren, Springer, Berlin 1925.

Anhang.

Konvektion in Gasen.

Nach den Arbeiten von Lorenz, Rice u. a. kann die Wärmeübergangszahl für Konvektion für eine grosse vertikale Wand, die von einem idealen Gase bespült wird, wie folgt formuliert werden:

$$w_c = 0,66 \cdot (a \cdot g)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho}{\eta}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot k \cdot \frac{(\Delta t)^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}} \quad (1)$$

Darin ist:

w_c = Wärmeübergang in W/cm².

a = $\frac{1}{273}$ = Ausdehnungskoeffizient der idealen Gase.

g = 981 cm/s² = Erdbeschleunigung.

η = Viskosität des Gases in Poise.

ρ = $\rho_0 (1 + a t)$ = Dichte des Gases bei der Temperatur t° C.

ρ_0 = Dichte bei 0° C (g/cm³).

k = Wärmeleitzahl des Gases in W/cm² °C.

Δt = Differenz zwischen Oberflächentemperatur der Wand und mittlerer Temperatur des Gases (in °C).

H = Höhe der vertikalen Fläche in cm.

Unter Verwendung der gaskinetischen Beziehung:

$$k = f \cdot c_v \cdot \eta \quad (2)$$

wo:

c_v = spezifische Wärme des Gases bei konstantem Volumen, ausgedrückt in Joule/cm³ °C;

f = Konstante, von der Zahl der Atome im Molekül abhängig;

für einatomige Gase $f = 2,5$
 » zweiatomige Gase $f = 1,75$
 » dreiatomige Gase $f = 1,4$

kann man die Viskosität eliminieren und an ihrer Stelle die dem Techniker besser vertraute spezifische Wärme einführen. Der Ausdruck (1) geht dann über in:

$$w_c = 0,66 \cdot f^{\frac{1}{2}} \cdot (a \cdot g)^{\frac{1}{4}} \cdot (Q \cdot c_v \cdot k)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(\Delta t)^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}} \quad (3)$$

Um die Abhängigkeit vom Druck deutlicher sichtbar zu machen, setzen wir:

$$Q = Q_1 \cdot p$$

wo: p = Druck des Gases in at abs.

Q_1 = Dichte des Gases bei der Temperatur $t^\circ \text{C}$ und Atmosphärendruck.

Gleichung (3) geht dann über in:

$$w_c = 0,66 \cdot f^{\frac{1}{2}} \cdot (a \cdot g)^{\frac{1}{4}} \cdot (Q_1 \cdot c_v \cdot k)^{\frac{1}{2}} \cdot p^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(\Delta t)^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}} \quad (4)$$

Es lassen sich daraus folgende Folgerungen ziehen:

1. Die durch Konvektion übertragene Wärme wächst mit der $\frac{5}{4}$ ten Potenz der Temperaturdifferenz;
2. mit der Quadratwurzel aus dem Druck;
3. mit der Quadratwurzel aus dem Produkt aus spezifischer Wärme bei konstantem Volumen, spezifischem Gewicht des Gases bei Atmosphärendruck und der Wärmeleitzahl.

Die unter 3. angeführten «Konstanten» sind mehr oder weniger von der Temperatur abhängig. Für unsere Zwecke kommt nur der relativ kleine Temperaturbereich von ca. 0

bis 60°C in Frage, und es ist daher zulässig, Mittelwerte, auf diesen Bereich bezogen, einzusetzen. Als solche verwenden wir die in Tabelle III angeführten:

Tabelle III.

Grösse	Einheit	Gas				
		Luft	Stickstoff	Kohlensäure	Helium	Wasserstoff
c_v	Joule/g $^\circ \text{C}$	0,72	0,75	0,70	3,15	10,1
Q_1	g/cm ³ bei 1 at	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$0,18 \cdot 10^{-3}$	$0,09 \cdot 10^{-3}$
k	W/cm ² $^\circ \text{C}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$13,9 \cdot 10^{-4}$	$16 \cdot 10^{-4}$
f	—	1,75	1,75	1,4	2,5	1,75

Schreiben wir schliesslich Formel (4) in der vereinfachten Form:

$$w_c = C \cdot p^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(\Delta t)^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}} \quad (5)$$

so kann man mit den obigen Werten die Konstante C gemäss Tabelle IV errechnen:

Tabelle IV.

	Luft	Stickstoff	Kohlensäure	Helium	Wasserstoff
$C \cdot 10^4$	5,5	5,5	4,7	12,5	14,5

Die konstruktive Entwicklung des Expansionschalters.

Von Fritz Kesselring, Berlin.

Auf Grund des Expansions- und Wasserstoffeffektes, welche die Löschung eines in wasserstoffabsplattender Flüssigkeit brennenden Lichtbogens bewirken, stellt der Autor allgemeine Richtlinien für den Bau eines ölfreien Hochleistungsschalters auf. Es wird sodann der nach diesen Richtlinien entwickelte Expansionschalter mit starrer oder elastischer Expansionskammer näher erläutert und auf einige besonders interessante konstruktive Einzelheiten hingewiesen. Zum Schlusse wird anhand eines Falles aus der Praxis das einwandfreie Funktionieren der beschriebenen Expansionschalter gezeigt *).

I. Allgemeine Gesichtspunkte.

Der Schaltapparatebau ist bis vor kurzem als dasjenige Gebiet der Elektrotechnik angesehen worden, auf das die theoretische Elektrizitätslehre nur in ganz geringem Masse befruchtend eingewirkt hat. Die bisherigen Konstruktionen kamen auf Grund von Erfahrungstatsachen und meist sehr gewagten Ueberlegungen ihrer Konstrukteure zustande. Dieser sonst in keinem anderen Gebiete der Elektrotechnik bestehende Zustand ist darauf zurückzuführen, dass man es beim Schalterproblem immer mit Gasentladungsvorgängen zu tun hat, oder, wie in einer früheren Arbeit¹⁾ auseinandergesetzt wurde, mit sogenannten elektronentheoretischen Stromkreisen. Bei dieser Art von Stromkreisen versagt die Maxwellsche Theorie. Andererseits spielen insbesondere beim Flüssigkeitsschalter aus-

serst komplizierte chemische und hydrodynamische Probleme eine wesentliche Rolle. Partant de l'effet d'expansion et de développement d'hydrogène provoquant l'extinction de l'arc électrique dans les liquides séparant par décomposition de l'hydrogène gazeux, l'auteur dresse des directives générales pour la construction d'un interrupteur sans huile à forte puissance de coupure. L'auteur décrit ensuite un interrupteur à expansion avec chambre d'expansion rigide ou élastique construit selon ses directives, en appuyant sur certains détails particulièrement intéressants. Pour terminer, l'auteur démontre par un exemple tiré de la pratique le fonctionnement irréprochable de l'interrupteur à expansion décrit.

serst komplizierte chemische und hydrodynamische Probleme eine wesentliche Rolle.

Das erste Eingreifen der Theorie verdanken wir Bruno Bauer²⁾. Er stellte sich zur Aufgabe, die in einem Oelschalter sich abspielenden energetischen Umsetzungen aufzudecken, insbesondere die Energiebilanz eines Abschaltvorganges aufzustellen. Diese Problemstellung charakterisiert die ganze Schalterfrage treffend, denn man versuchte nicht, einen Schalter auf neuem Prinzip zu finden, sondern den an sich zur Zufriedenheit funktionierenden Oelschalter überhaupt verstehen zu lernen. In der Zwischenzeit ist die Energiebilanz des Abschaltvorganges unter Oel mit allen Feinheiten aufgestellt worden³⁾. Damit waren die in einem Oelschalter auftretenden mechanischen Beanspruchun-

²⁾ Bull. SEV 1915, S. 141.

³⁾ Kesselring, Elektrische Schaltgeräte, Anlasser und Regler, S. 97; v. Engel, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern, IX. Bd., Heft 1, 1930, S. 1;

Bruce, The Distribution of Energy Liberated in an Oil Circuit-Braker, J. I. E. E., Mai 1931.

*) Im Beisein schweizerischer Interessenten wurde dieser Schalter am 17. April d. J. auf dem Versuchsstand der Siemens-Schuckert-Werke in Berlin in erfolgreichen Versuchen vorgeführt.

¹⁾ E. T. Z. 1929, S. 1005.