Die Vorausberechnung der elektrischen Durchspannung für feste Isolierstoffe

Autor(en): **Kummer, W.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **85/86 (1925)**

Heft 3

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-40058

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

INHALT: Die Vorausberechnung der elektrischen Durchbruchspannung für feste Isolierstoffe. — Die projektierten Kraftwerke Oberhasli der BKW. — Wettbewerb Aargauische Gewerbe-Ausstellung Baden 1925. — † Edmond Imer-Schneider. — Miscellanea: Schwere Blechbalkenbrücke. Ausfuhr elektrischer Energie. Normalisierung der Papierformate. Erweiterung des Strassburger Hafens. Société des Ingenieurs civils de France. Die Dampfkessel-Explosionen in Deutschland im Jahre 1923. Künstlicher Marmor. Gebäude für das Internationale Arbeitsamt in Genf. Elektrifikation der Schweizerischen Bundesbahnen. — Preisausschreiben: Stossdämpfungs-Vorrichtungen für Automobile. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Section de Genève de la S. I. A.

Band 85. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 3

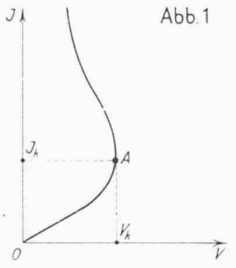
Die Vorausberechnung der elektrischen Durchbruchspannung für feste Isolierstoffe.

Von Prof. Dr. W. KUMMER, Ingenieur, Zürich.

In einem kurzen Aufsatze: „Die Bruchgefahr bei mechanischer und bei elektrischer Beanspruchung fester Körper", auf Seite 253 von Band 82 (am 17. Nov. 1923) der „Schweiz. Bauzeitung" haben wir darauf hingewiesen, dass sich auf elektrischem Gebiete aus Beanspruchungs-Proben im einaxigen Zustand in der Regel eindeutige Sicherheitszahlen ergeben, die auch zur Beurteilung des zweiachsigen Spannungszustandes verwendbar sind, während auf mechanischem Gebiete im allgemeinen alle nicht mehr einachsigen Spannungszustände durch besondere, diesen Zuständen angepasste Proben erst abgeklärt werden müssen, bevor zuverlässige Sicherheitszahlen aufgestellt und benutzt werden können. Im vorliegenden Aufsatze soll nun von Methoden der Vorausberechnung der elektrischen Durchbruchspannung die Rede sein, die sich auf die Verwendung allgemein bekannter physikalischer Zustandsänderungen stützen, damit gewissermassen den Vorgang der Durchbruchserscheinung physikalisch „erklären" und der Vornahme von Beanspruchungsproben nicht mehr eine grundlegende, sondern nur mehr eine kontrollierende Bedeutung zuweisen. Die bezüglichen Methoden befinden sich in den Forschungsarbeiten von *K. W. Wagner*, Berlin[1]) und von *H. Schait*, Zürich[2]), die wir in unserem obgenannten Aufsatze bereits erwähnten, dargelegt; wir hatten aber in unserem Aufsatze diese Methoden noch unberücksichtigt gelassen, weil sie mit der Tendenz des Aufsatzes ohne unmittelbaren Zusammenhang waren. Seither haben nun die diesen Methoden zu Grunde liegenden Gedanken Arbeiten weiterer Fachleute hervorgerufen, sodass wir mit der Bekanntgabe dieser Methoden an unsere Leser nicht länger zögern wollen.

Diesen Methoden liegt die gemeinsame Idee zu Grunde, dass der elektrische Durchschlag als Erwärmungsproblem aufgefasst werden dürfe, wobei als Wärmequellen die im elektrischen Feld im Isolator-Innern hervorgerufenen Verluste in Betracht fallen; das Unterscheidende der zwei Methoden liegt darin, dass nach Wagner die Unhomogenität des Materials in einer betrachteten dünnen Schicht *lokale* übermässige Erhitzungen und daher die verhängnisvolle Vergrösserung des Verluststroms bewirkt, während nach H. Schait die praktisch homogene Schicht bei übermässiger Produktion von Verlustwärme, insbesondere durch einen Vorgang der Karbonisierung, im Falle des Vorliegens von Isolierpapier oder ähnlichen Substanzen, *gleichmässig* die verhängnisvolle Vergrösserung des Verluststromes erleidet. Vor kurzem ist die zweite dieser beiden Auffassungen sowohl von *W. Rogowski*[3]) als auch von *L. Dreyfus*[4]) benutzt worden, um in grundsätzlich gleicher Weise, wie es in der Arbeit von H. Schait geschehen ist, zu einer Vorausberechnung der elektrischen Durchbruchspannung fester Isolatoren zu gelangen; gleichzeitig lehnen sowohl Rogowski als auch Dreyfus die von Wagner vertretene Auffassung ab. Im folgenden sollen nun die beiden Auffassungen, die man einerseits als die „lokale Erwärmungshypothese" (Dreyfus nennt sie die „Kanaltheorie"), anderseits als die „gleichmässige Erwärmungshypothese" (im Gegensatz zur „Kanaltheorie" darf man sie auch als „Homogenschichttheorie" bezeichnen) unterscheiden kann, näher betrachtet werden.

Die Wahrnehmung, dass bei vielen Durchschlagsversuchen das Material vor dem Eintritt des Durchschlags an einzelnen Stellen stärker erwärmt erscheint, als an andern Stellen, bildet die Grundlage der von K. W. Wagner vertretenen Hypothese einer nur lokal auftretenden massgebenden Erwärmung. Mit einer besonders ausgebildeten Versuchsanordnung hat er an ebenen Probeplättchen von nur einigen hundertstel Millimeter Dicke für verschiedene Isolierstoffe den zahlenmässigen Zusammenhang der den Isolierstoff beanspruchenden Spannung V und der dabei durch den Isolierstoff hindurchgehenden Verluststromstärke J experimentell bis über den Durchschlagspunkt A hinaus ermittelt und dabei Kurvenbilder nach Art der in Abb. 1 aufgezeichneten erhalten. Analytisch ist die „Kennlinie" als Funktion: $f(V, J) = 0$ darstellbar und muss nun der Vorausberechnung zugänglich sein, zum Zwecke des Erhalts der gesuchten Durchbruchspannung V_k im Punkte A. Die schwächste, schliesslich zuerst durchbrechende Stelle des Isolierplättchens wird von Wagner als fadenförmiger Leiter, mit einer Länge gleich der Plattendicke, und mit einem unbestimmten, nicht weiter interessierenden Querschnitt aufgefasst. Der in diesem Faden auftretende Effektverlust wird $V \cdot J$ gleichgesetzt und muss im stationären Zustande als Wärme von den Nachbarfäden aufgenommen werden können, sofern nicht eine unzulässige Steigerung der Temperatur t dieses Fadens erfolgen soll; bedeutet $f_1(t)$ die vom Faden abgegebene Wärme, so gilt:



$$V \cdot J = f_1(t).$$

Da mit dem Steigen der Temperatur t der elektrische Widerstand $R = \frac{V}{J}$ des Fadens abnimmt, wofür die Beziehung:

$$\frac{V}{J} = f_2(t)$$

gesetzt werden kann, besteht nun die Möglichkeit, durch Elimination von t aus den Funktionen f_1 und f_2, die Funktion F der „Kennlinie" und damit die Durchbruchspannung V_k a priori zu berechnen. Wagner hat diese Rechnungen für zwei verschiedene Ansätze für f_1 und drei verschiedene Ansätze für f_2 formal, d. h. algebraisch, ohne Zahlenbeispiele, durchgeführt und dabei stets die mit den Experimenten übereinstimmende Proportionalität von Durchbruchspannung und Plattendicke ermittelt. Er zieht aus seiner Arbeit die Schlüsse, dass seine Auffassung es ermögliche, „die verwirrende Fülle der Durchschlags-Erscheinungen an festen Isolatoren unter einem einheitlichen Bilde zusammenzufassen", und dass dadurch der Vorgang des elektrischen Durchschlags „der quantitativen Behandlung zugänglich gemacht" sei. Wir finden diese, von Rogowski und von Dreyfus allgemein abgelehnten Schlüsse zulässig für dünnste Schichten von Isolierstoffen, für die wir sie als experimentell hinreichend begründet glauben, während wir sie für dicke Isolationen ebenfalls ablehnen.

Für dicke Isolationen hat H. Schait in seiner, auf unsere Veranlassung durchgeführten, Forschungsarbeit eine Methode der Vorausberechnung der elektrischen Durchbruchspannung angegeben, die, wie schon erwähnt, auf der Hypothese einer gleichmässigen Isolationserwärmung fusst,

[1]) Vergl. Seite 438 des Sitzungsberichts der Berliner «Akademie» vom 16. November 1922, sowie Seite 1034 des Dezember-Heftes 1922 des «Journal A. I. E. E.».

[2]) Vergl. Seite 619 des November-Heftes 1923 des «Bulletin des S. E. V.», sowie Dissertation Nr. 333 der E. T. H., Zürich.

[3]) Vergl. Seite 153 von Bd. XIII (31. Mai 1924) des «Archiv für Elektrotechnik».

[4]) Vergl. Seite 321 (Juli 1924) sowie Seite 577 (Dez. 1924) von Band XV des «Bulletin des S. E. V.»

wie sie nach ihm auch von Rogowski und von Dreyfus benutzt worden ist. Für dicke Isolationen ist diese Hypothese gegenüber derjenigen von Wagner vor allem deshalb zutreffender, weil lokale Inhomogenitäten die messbaren Verluste im dickwandigen Dielektrikum nicht wesentlich beeinflussen. Da für dicke Isolationen die Kenntnis der Temperaturverteilung in denselben von Belang ist, halten wir dafür, dass die auf wärmetheoretischer Grundlage fussende Vorausberechnung vorerst nur am Zylinder-Kondensator, der technisch als Kabel- und als Durchführung übrigens auch besonders wichtig ist, zur Abklärung zu bringen sei, für welche Kondensatorgestalt die Temperatur-Verhältnisse in und aus der Isolation die einfachsten sind. In der Arbeit von Schait, die sich ausschliesslich mit dem Einleiterkabel befasst, ist denn auch das Durchschlags-Problem demgemäss behandelt. Dabei wird der Vorausberechnung der Durchschlagsspannung V_k die Gleichung

$$V_k = J_k \cdot R_k$$

zu Grunde gelegt, in der J_k die Durchbruchstromstärke und R_k den Isolatorwiderstand im Durchbruchpunkte bezeichnen. Zur Ermittlung von J_k und von R_k ist zunächst der in Abbildung 2 dargestellte Querschnitt der zwischen den Radien r_1 und r_2 liegenden Isolation zu betrachten; deren Elementar-Hohlzylinder von der Achsenlänge 1, vom Radius r und der Dicke dr ist der Sitz der Wärmeproduktion $J \cdot dV$, zufolge des Ohmschen Widerstandes:

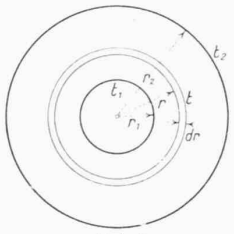


Abb. 2

$$d\,R = \frac{dr}{g \cdot 2\,\pi\,r \cdot 1}$$

des mit der galvanischen Leitfähigkeit g behafteten Elementar-Hohlzylinders. Bedeutet σ die für die radial strömende Wärme gültige Widerstandszahl, so kann im stationären Zustand:

$$\frac{d\left(\frac{2\,\pi\,r \cdot 1}{\sigma} \cdot \frac{dt}{dr}\right)}{dr} = -J \cdot \frac{dV}{dr}$$

gesetzt werden, sowie auch:

$$d\left(\frac{2\,\pi}{\sigma} \cdot y\right) = -J \cdot \frac{x}{y} \cdot dt$$

sofern man die zur Kürzung dienenden Ansätze

$$r \cdot \frac{dt}{dr} = y; \qquad r \cdot \frac{dV}{dr} = x$$

benutzt. Aus der Beziehung:

$$dV = J \cdot dR = J \cdot \frac{dr}{g \cdot 2\,\pi\,r}$$

folgt:

$$r \cdot \frac{dV}{dr} = J \cdot \frac{1}{g \cdot 2\,\pi}$$

oder, mit dem Kürzungsansatze, also:

$$x = J \cdot \frac{1}{g \cdot 2\,\pi}$$

Indem man diesen Wert von x in die obenstehende, die Grösse x enthaltende Differentialgleichung einsetzt, folgt bei gleichzeitiger Umstellung derselben:

$$y \cdot d\left(\frac{2\,\pi}{\sigma} \cdot y\right) = \frac{J^2}{2\,\pi g} \cdot dt$$

Während σ als von der Temperatur unabhängig gelten kann, ist g ausgesprochenermassen von ihr abhängig, und zwar mit ihr steigend. Die Integration der letzten Gleichung führt daher, unter Benutzung der Integrationskonstanten A, die mit der Temperatur t_2 am Aussenradius r_2 bestimmbar ist, auf die Form;

$$y^2 = J^2 \cdot [\varphi\,(t) + A]$$

die bei Einführung des ursprünglichen Wertes von y und der Integrationskonstanten B auch durch den Ausdruck:

$$\lg\, r = \frac{1}{J} \cdot \int \frac{dt}{\sqrt{\varphi\,(t) + A}} + B$$

also auch durch eine Funktion:

$$t = \Phi\,(r)$$

gegeben werden kann. Diese Funktion weist für einen gewissen, aus ihr leicht ableitbaren Wert von r diejenige Temperatur t_k aus, bei dem die für den Durchschlag in Betracht fallende Stromstärke J_k herrscht, die damit endgültig aus der Gleichung:

$$\lg\, r = \frac{1}{J} \cdot \int \frac{dt}{\sqrt{\varphi\,(t) + A}} + B$$

bestimmbar ist. Indem man nun zur Auswertung des Ausdrucks

$$R = \frac{1}{2\,\pi} \int \frac{dr}{2\,\pi\,r \cdot g}$$

die Temperatur-Abhängigkeit von g in die Abhängigkeit dieser Grösse vom Radius umwandelt, lässt sich mit dem bei t_k herrschenden g_k auch noch R_k bestimmen, womit die Vorausberechnung von V_k gemäss:

$$V_k = J_k \cdot R_k$$

zum Abschluss gelangt.

In dieser Arbeit von Schait, wie übrigens auch in der erwähnten, auf ähnliche Art analytisch durchgeführten Arbeit von Rogowski, sind für Zylinder-Kondensatoren numerische Beispiele der Vorausberechnung der Durchbruch-Spannung nicht mitgeteilt worden. Solche numerische Berechnung enthält dagegen die hier ebenfalls schon erwähnte Arbeit von Dreyfus, die ebenfalls eine Rechnungsweise zeigt, die mit der nach Schait hier mitgeteilten wesensverwandt ist.

Es darf erwartet werden, dass nun in rascher Folge weitere wertvolle Beiträge zur Vorausberechnung der elektrischen Durchbruchspannung fester Isolatoren bekannt werden, und dass sich in Bälde die Hochspannungstechnik neuer Dimensionierungsregeln der massgebenden Isolationen werde bedienen können.

Die projektierten Kraftwerke Oberhasli der „Bernischen Kraftwerke" A.-G.

(Schluss von Seite 14.)

Das Kraftwerk Grimsel-Handeck.

I. Projektübersicht. Alle Anlagen der Wasserspeicherung und der Zentrale Handeck liegen vollständig im Aaregranit (Protogin). Die geplanten Speicherbecken auf der Grimsel und auf Gelmer sollen beide durch Abriegelung alter Gletschermulden entstehen, in denen schon heute kleine Seen vorhanden sind. Beim Gelmersee wird der jetzt auf Meereshöhe 1822 liegende Seespiegel um 30 m gehoben, wozu der Seeauslauf beim Gelmerkragen abgesperrt wird. Auf der *Grimsel* wird der heute auf der Meereshöhe 1875 liegende Seespiegel um 37 m überstaut. Die Abriegelung des Beckens kann aber nur bei der Nebenmauer auf der östlichen Seite, bei der Seeuferegg, über dem jetzigen Seespiegel erfolgen; der weitaus grössere Teil des Grimselspeichers entsteht durch die Ueberstauung des tiefer als die Seen liegenden Aarbodens zwischen der Spitallamm und dem Unteraargletscher (Abb. 9 bis 12, S. 29 bis 33). Das rund 12 km lang gestreckte Tal von der Spitallamm aufwärts bis zur Gabelung in die Täler des Finsteraar- und Lauteraargletschers liegt in seiner Längsaxe parallel dem allgemeinen Streichen WSW—ONO des Gesteins im Aaremassiv, während von der Spitallamm (Abb. 13) talabwärts die Flussrinne nahezu senkrecht dazu verläuft.

Es wäre natürlich am einfachsten, wenn beide Speicherbecken, Grimsel und Gelmer, auf den gleichen Horizont gestaut werden könnten. Nun liegt aber bei der Grimsel die Hauptabriegelung in der schmalen Spitallamm, während auf Gelmer zum Aufstau des Sees der flache Gelmerkragen abzusperren ist. Aus diesem Grunde kommt der Speicherraum auf Gelmer von etwa Kote 1850 aufwärts teurer als auf der Grimsel und es würde z. B. bei Kote 1870 die Speicherung auf Gelmer ungefähr doppelt so teuer, als beim Grimselbecken mit dem Stauziel auf 1912. Als Folge der natürlichen Verhältnisse wird also das Grimselbecken zum Haupt- und das Gelmerbecken zum Nebenspeicher.