

Experimentelle Ermittlung der Spannungsverteilung bei Kondensatorgruppen.

Von

A. Schwaiger.

(Mitt. Nr. 5 aus dem Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe).

1. Allgemeines. In der Hochspannungstechnik gibt es eine Reihe von Anordnungen und Konstruktionen, welche eine Gruppenschaltung von Kondensatoren darstellen; es sei nur an die bekanntesten derselben, an die Rollenblitzableiter und Kettenisolatoren, erinnert. Meist werden nur 2 von sämtlichen Elektroden dieser Anordnungen mit der Stromquelle verbunden, und es besteht dann die Aufgabe, die Spannungsverteilung auf die übrigen Elektroden bzw. Kondensatoren zu ermitteln, um die Rechnung auf Beanspruchung des verwendeten Isoliermaterials durchführen zu können.

Die Berechnung der Spannungsverteilung auf die einzelnen Kondensatoren wäre eine recht umständliche Aufgabe, wenn man alle Kondensatoren dabei berücksichtigen müßte. Glücklicherweise tritt uns aber die Aufgabe in dieser Allgemeinheit in der Praxis niemals entgegen. Die Elektroden der Anordnungen haben nämlich niemals eine willkürliche Lage gegeneinander, sie weisen vielmehr stets gewisse Symmetrien auf und außerdem sind einzelne Kapazitäten gegenüber den anderen so groß, daß durch sie in der Hauptsache die Spannungsverteilung bestimmt wird. Wir dürfen dann eine ganze Reihe kleiner Kondensatoren bei der Berechnung vernachlässigen. Infolge dieser beiden Umstände vereinfacht sich die Berechnung ganz wesentlich. Beispielsweise liegen für den Rollenblitzableiter die Verhältnisse so, daß nur die Kapazitäten berücksichtigt werden müssen, die jede Rolle mit den ihr unmittelbar benachbarten Rollen bildet sowie der Kapazitäten der einzelnen Rollen gegen Erde. Und ganz ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Hängeisolatoren.

Die Entscheidung darüber, wie weit man in der Vereinfachung der Ersatzschaltung gehen darf, kann natürlich nur durch den Versuch erfolgen. Man wird also die Rechnung stets durch den Versuch nachprüfen müssen. Leider stößt man aber bei der Messung der Spannungsverteilung auf große meßtechnische Schwierigkeiten. Die Kapazitäten der genannten technischen Anordnungen sind nämlich meist viel kleiner als die Kapazitäten der zur Verfügung stehenden Meßinstrumente. Durch das Anlegen von statischen Voltmetern wird infolgedessen die Spannungsverteilung wesentlich verändert, ja durch das Anlegen selbst kurzer Zuleitungen wird bereits die Spannungsverteilung beeinflusst, eine direkte Messung der Spannungsverteilung dürfte also aus diesen Gründen überhaupt unmöglich sein. Wir haben also keine Kontrolle, ob die bei der Berechnung gemachten Vernachlässigungen zulässig sind, d. h. ob die berechnete Spannungsverteilung mit der wahren genügend genau übereinstimmt.

Es muß als ein großer Fortschritt bezeichnet werden, daß es W. Petersen gelang, die Spannungsverteilung bei einer sehr wichtigen technischen Anordnung, den Hängeisolatoren, auf indirektem Wege, nämlich durch Messung der Ladeströme zu ermitteln. Petersen ging so vor, daß er den Ladestrom der einzelnen Glieder der Isolatorenkette durch einen Widerstand geeigneter Größe fließen ließ und mittels eines Elektrometers den Spannungsabfall im Widerstand feststellte. Durch eine einfache Eichung kann daraus die Spannungsverteilung

auf die einzelnen Glieder der Isolatorenkette ermittelt werden. Die Störung der wahren Spannungsverteilung durch das Meßinstrument konnte Petersen dadurch vermeiden, daß er das Elektrometer und den Widerstand in die Metallkappe der Isolatoren versenkte. Der Versuch ergab eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch.

Neuerdings beschäftigt die Elektrotechnik ein sehr wichtiges Problem: das Verhalten von Spulen beim Eindringen von Sprungwellen. Für die Berechnung der bei diesen Vorgängen auftretenden Erscheinungen wird bekanntlich angenommen, daß man die Spule durch die Ersatzschaltung Abb. 1 darstellen kann. Die Berechnung ergibt, daß sich die Spule im ersten Augenblick, d. h. beim Anprall der Sprungwelle ebenso verhält, als wenn die Induktivitäten der einzelnen Windungen unendlich groß wären, für die Spannungsverteilung auf die einzelnen Windungen sind lediglich die Kapazitäten der Kondensatoren maßgebend. Wir erhalten also die Spannungsverteilung im ersten Augenblick, wenn wir die Kondensatorengruppe von den Windungen los-

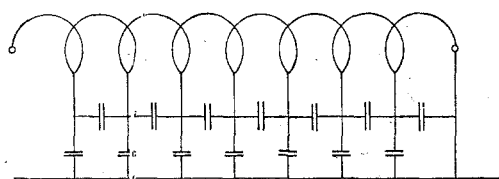


Abb. 1.

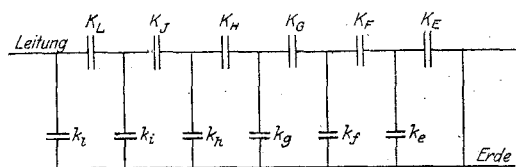


Abb. 2.

schalten und für sich allein betrachten. In Abb. 2 ist die Kondensatorengruppe dargestellt. Das ist aber genau dieselbe Ersatzschaltung, wie die für die Hängeisolatoren. Die Gesetze für die Spannungsverteilung an Hängeisolatoren können also ohne weiteres auch auf Spulen übertragen werden.

Allerdings ist bis jetzt noch nicht der experimentelle Beweis erbracht worden, ob durch die Kondensatorenschaltung Abb. 2 die Kapazitätsverhältnisse der Spulen getreu nachgebildet sind, und ferner stehen auch noch die

Versuche aus über die Größe des Verhältnisses der Erdkapazität c zur Windungskapazität C einer Spule.

Gelänge es, die Spannungsverteilung auf die einzelnen Windungen, welche durch die Kapazitäten bedingt ist, zu messen, und ergäbe sich tatsächlich das gleiche Gesetz wie für die Hängeisolatoren, so wäre das ein starker Beweis für die Richtigkeit bzw. für die Hinlänglichkeit der Ersatzschaltung und ferner könnte

daraus das Verhältnis $\frac{c}{C}$ ermittelt werden, dessen Kenntnis für die Beurteilung der Windungsbeanspruchung sehr wichtig ist.

Das Nächstliegende wäre nun zu versuchen, ob man die Spannungsverteilung bei Spulen — in Frage kommen Schutzspulen, Wicklungen von Transformatoren und Generatoren — nach der von Petersen angegebenen Methode ermitteln kann. Soweit der Verfasser beurteilen kann, dürfte diese Methode hier versagen.

Der Verfasser hat in seinem Lehrbuch der Festigkeit der Isoliermaterialien¹⁾ eine Methode zur Auffindung der Spannungsverteilung an Hängeisolatoren mitgeteilt, die auf einem andern Meßprinzip beruht wie die von Petersen angegebene Methode. Das vom Verfasser angegebene Verfahren kann auch zur Ermittlung der Spannungsverteilung bei Vielfachfunkenstrecken und Wicklungen jeder Art angewendet werden. Da diesen Fragen z. Z. größeres Interesse entgegengebracht wird, sollen einige Versuchsergebnisse an Wicklungen von Schutzspulen und Transformatoren mitgeteilt werden. Zum besseren Verständnis der Meßmethode sollen zunächst die theoretischen Grundlagen derselben kurz erläutert werden.

¹⁾ „Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien“. Springer Berlin. S. 70.

2. Theoretische Grundlagen der Meßmethode. Das Gesetz der Spannungsverteilung an Kettenisolatoren wurde auf analytischem Wege gefunden; danach ist die Spannung P_n eines Punktes zwischen n und $(n+1)$ ten Glied gegen Erde

$$P_n = P \frac{\sin \alpha \cdot n}{\sin \alpha \cdot z}. \quad (1)$$

P bedeutet die gesamte Spannung an der Kette, $\alpha = \sqrt{\frac{c}{C}}$; z = Gesamtzahl der Glieder.

Diese Gleichung gilt natürlich nur für den Fall, daß die Glied- und Erdkapazitäten aller einzelnen Elemente unter sich gleich groß sind. Wir werden später sehen, daß diese idealen Verhältnisse nicht immer vorliegen. Die Gleichung (1) ist in solchen Fällen natürlich nicht mehr anwendbar.

Der Verfasser hat eine graphische Methode zur Ermittlung der Spannungsverteilung angegeben¹⁾, die auch anwendbar ist, wenn die Werte C bzw. c unter sich nicht gleich groß sind. Diese Methode werden wir im folgenden anwenden, sie soll deshalb vorher kurz erläutert werden. Die eingehende Ableitung des Diagrammes findet sich im genannten Buch des Verfassers.

Zwischen Kapazitätsstrom und Spannung eines Kondensators besteht die Beziehung

$$i = \omega c P. \quad (2)$$

Setzen wir willkürlich die Kreisfrequenz $\omega = 1$, so wird

$$i = c P$$

oder

$$P = \frac{1}{c} \cdot i, \quad (3)$$

d. h. die Kondensatorspannung ist dem Ladestrom proportional.

Machen wir in Abb. 3 die Strecke $Oa = c$, $Ob = 1$, so ist $\tan \varphi = \frac{1}{c}$. Tragen wir von O aus den Ladestrom als Abszisse und die Kondensatorspannung P als Ordinate auf, so wird die Gleichung (3) durch die Gerade, die durch den Punkt O geht und die zur Strecke ab parallel ist, dargestellt. Beim Ladestrom OA ist also z. B. die Kondensatorspannung AB .

Wir nehmen an, die Kondensatorgruppe bestände aus je 6 Kondensatoren K und k mit den Kapazitäten C und c . Der letzte Kondensator K_E sei mit der Erde verbunden, der erste K_L mit der zur Stromquelle führenden Leitung L (Abb. 2).

Bei der Ermittlung der Spannungsverteilung beginnen wir beim Kondensator K_E ; wir kennen zwar dessen Spannung noch nicht, nehmen aber probeweis an, daß sie P_E Volt betrage.

Wir machen im Diagramm Abb. 4 die Strecken OK gleich der Kapazität C und ferner Ok gleich der Kapazität c . Meist kennen wir die Absolutwerte von C und c nicht, sondern nur das Verhältnis $\frac{C}{c}$. Ist dies z. B. gleich $\frac{1}{5}$, so machen wir OK fünfmal so groß wie Ok , die Einheit des Maßstabes selbst für die Strecken ist beliebig. Auch die Strecke $Oa = 1$ dürfen wir beliebig groß machen. Die einmal gewählten Werte müssen aber für die ganze Dauer der Konstruktion beibehalten werden.

Die Spannung P_E des Kondensators K_E wird zu OE' angenommen. Auch der Maßstab für die Spannung kann beliebig gewählt werden.

¹⁾ Schwaiger, „Lehrbuch etc.“ S. 64.

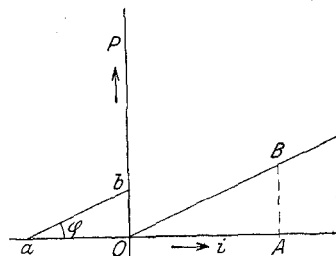


Abb. 3.

Wir ziehen durch O die Parallele zu Ka und erhalten mit der Parallelen zur Abszissenachse durch E' den Schnittpunkt E. Die Strecke $EE' = OD$ stellt den Ladestrom von K_E bei der Spannung P_E dar.

Der Kondensator k_e liegt nach dem Schaltbild ebenfalls an der Spannung P_E .

Wir können deshalb den Ladestrom von k_e leicht finden. Wir machen De parallel zu ka; dann ist $Ee = Dd$ der Ladestrom des Kondensators k_e .

Wir gehen nun einen Schritt weiter. Durch den Kondensator K_F fließt die Summe der eben berechneten Ladeströme, also der Ladestrom $Od = E'e$. Wir können die Spannung des Kondensators leicht ermitteln. Wir legen durch E' die Parallele zu Ka und erhalten den Schnittpunkt F mit der verlängerten Geraden de. Die Strecke $eF = E'F'$ stellt dann die Spannung P_F des Kondensators K_F dar. P_F ist natürlich größer als P_E , da P_F

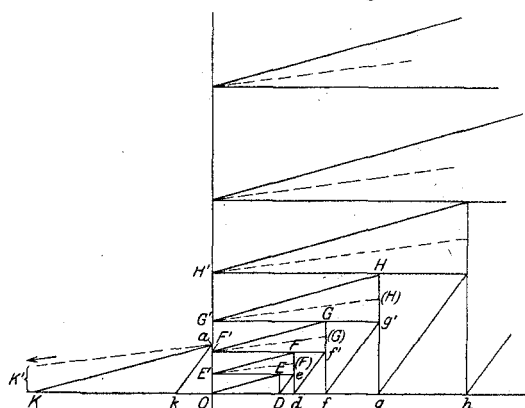


Abb. 4.

einen größeren Ladestrom führen muß als P_E .

Der Kondensator k_f liegt an der Spannung $P_f = P_E + P_F = OF' = dF$. Der Ladestrom dieses Kondensators ist also df . Der Kondensator K_G muß den Ladestrom $Of = F'f'$ führen. Wir können also seine Spannung ermitteln; sie ist durch Strecke $F'G'$ dargestellt usw. Wir erhalten in dieser Weise das vollständige Diagramm für die Spannungsverteilung der Kondensatorgruppe.

Für die Gesamtspannung erhalten wir

$$P = P_E + P_F + P_G + \dots + P_L$$

und diese Spannung soll gleich der Spannung P der Stromquelle sein, an der die Anordnung liegt. Aus der Gleichung (1) sehen wir, daß die Spannungen

$$P_E, P_E + P_F, P_E + P_F + P_G \text{ usw.}$$

der Gesamtspannung P proportional sind, wir machen also die Ordinate $OL' = P$ und lesen an dem so eingeführten Maßstabe die Größe der Spannungen P_E, P_F usw. ab. Die so erhaltenen Spannungen

$$P_E, P_E + P_F, P_E + P_F + P_G \text{ usw.}$$

tragen wir über der Ordnungsnummer 1, 2, 3 ... auf und erhalten die Abb. 5. Die Gleichung dieser Kurve lautet¹⁾

$$P_n = P \frac{\sin \alpha n}{\sin \alpha z}$$

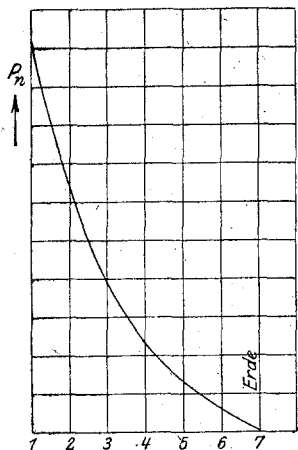


Abb. 5.

Damit haben wir die theoretische Grundlage für unsere Meßmethode gewonnen. Es wäre natürlich das beste, wenn wir die Kurve der Abb. 5 direkt durch Messen bestätigen könnten, indem wir parallel zu K_E, K_F, \dots Meßinstrumente legen. Wir haben bereits die Gründe kennen gelernt, welche diese Messungen unmöglich machen.

Wir können aber aus der Charakteristik der Spannungsverteilung eine andere Charakteristik ableiten, die „Überschlagscharakteristik“ der Kondensatorgruppe,

¹⁾ Daß die graphische Lösung zum gleichen Resultat führt wie die analytische, ersieht man leicht daraus, daß die Konstruktion Abb. 4 der Rüdenbergschen Differenzengleichung (ETZ 1914, Heft 15) gehorcht.

und diese Charakteristik können wir auch auf experimentellem Wege leicht ermitteln. Die Bestimmung von $\frac{c}{C}$ irgend einer gegebenen Anordnung kann dann in folgender Weise geschehen. Wir ermitteln die Überschlagscharakteristiken für alle möglichen Werte von $\frac{c}{C}$ auf rechnerischem Wege und erhalten dann eine Schar von Kurven, die wir Normalkurven nennen wollen. Dann nehmen wir die Überschlagscharakteristik der gegebenen Anordnung auf experimentellem Wege auf, zeichnen die so erhaltene Kurve auf ein Pauspapier im Maßstab der Normalkurven, legen das Pauspapier auf diese Kurvenschar und sehen zu, ob sich die experimentell ermittelte Kurve mit irgend einer Kurve der ganzen Schar deckt. Ist das der Fall, so lesen wir ab, wie groß $\frac{c}{C}$ dergedeckten Normalkurve ist, und wissen dann, daß der gegebenen Anordnung dasselbe $\frac{c}{C}$ zugeschrieben werden muß. Deckt sich die Kurve aber mit keiner der Normalkurven, so müssen wir schließen, daß auch noch andere Kapazitäten die Spannungsverteilung der Anordnung wesentlich beeinflussen, oder aber die Kapazitäten C und c der einzelnen Elektroden sind verschieden groß. Darauf kommen wir nachher noch zu sprechen.

Zunächst soll nun erläutert werden, was man unter Überschlagscharakteristik einer Anordnung versteht. In Abb. 6 ist ein Apparat dargestellt, an welchem die Erscheinungen sehr bequem studiert werden können. Auf einem Brett B sind dünne Porzellanröhren R in einer Reihe so angeordnet, daß man ihren Abstand voneinander bequem vorstellen kann. Auf den Porzellanröhren ruhen Metallkugeln; die Kugeln seien mit den Buchstaben a, b, c, d, \dots gezeichnet; die Abstände der Porzellanröhren voneinander seien gleich groß eingestellt, es haben also auch die aufgelegten Kugeln gleiche Abstände.

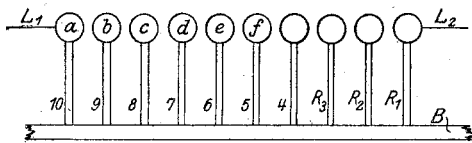


Abb. 6.

Wir nehmen nun alle Kugeln ab und legen zunächst Kugel a auf die Röhre R_2 und Kugel b auf die Röhre R_1 und verbinden sie mit den Klemmen eines Transformators. Kugel 2 wird außerdem geerdet. Die Spannung wird dann so hoch gesteigert, bis die Luftstrecke zwischen den beiden Kugeln durchschlagen wird. Das sei bei der Spannung P_{ab} der Fall. Dann legen wir Kugel a auf R_3 , b auf R_2 und Kugel c auf Röhre R_1 und verbinden a und c mit den Klemmen des Transformators und legen Kugel c an Erde. Die Spannung wird wieder so hoch gesteigert, bis eine Entladung eintritt. Der Überschlag tritt wie vorher zwischen den beiden ersten Kugeln auf. Wir wissen, daß in diesem Augenblick dort die Spannung P_{ab} herrschen muß. Die Gesamtspannung zwischen den Kugeln a und c ist gleich der Spannung des Transformators, die wir mit einem Voltmeter messen können. Sie sei P_{ac} .

Wir wollen alle Spannungen auf die Überschlagspannung P_{ab} als Einheit beziehen und erhalten so für die Spannung zwischen a und c den Wert $\frac{P_{ac}}{P_{ab}}$, der kleiner als zwei ist.

Danach verbinden wir die Klemmen des Transformators mit den Kugeln a und d der Röhren R_4 und R_1 . Die Spannung wird wieder so hoch gesteigert, bis Entladung eintritt. Der Überschlag kommt wieder zwischen den beiden ersten Kugeln zustande, wenn dort die Spannung P_{ab} herrscht. Die Spannung zwischen

a und d, gemessen in Vielfachen von P_{ab} ist $\frac{P_{ad}}{P_{ab}}$. Dieser Wert ist kleiner als 3.

In dieser Weise fahren wir fort und tragen schließlich die Werte $\frac{P_{ac}}{P_{ab}}, \frac{P_{ad}}{P_{ab}}$ usf., abhängig von der Zahl der eingeschalteten Funkenstrecken, auf¹⁾; die so erhaltene Kurve ist die Überschlagscharakteristik der Anordnung. Die Kurve Abb. 9 bis 13 zeigt die Überschlagscharakteristiken von technischen Anordnungen.

Wir kommen nunmehr zur rechnerischen Ermittlung der Überschlagscharakteristik. Hierzu benützen wir das Diagramm Abb. 4.

Aus unseren Versuchen ist uns bekannt, daß der Überschlag immer an der ersten Funkenstrecke erfolgt, weil zwischen den Elektroden a und b stets die höchste Spannung herrscht. (Als „letzte“ Funkenstrecke bezeichnen wir die der Erde zunächst gelegene).

Sind zwei Funkenstrecken eingeschaltet, so ist die Spannung P_{ab} im Diagramm durch die Strecke $E'F'$ und die Gesamtspannung durch die Strecke OF' dargestellt.

Wir messen die Strecken $E'F'$ und OF' in mm ab und bilden $\frac{OF'}{E'F'}$ und erhalten

hierfür einen Wert, der kleiner als 2 ist.

Sind 3 Funkenstrecken eingeschaltet, so ist die Spannung P_{ab} im Diagramm durch die Strecke $F'G'$ und die Gesamtspannung durch OG' dargestellt. Wir messen $F'G'$ und OG' wieder in mm ab und bilden $\frac{OG'}{F'G'}$ und erhalten hierfür einen Wert, der kleiner als 3 ist. In dieser Weise fahren wir fort und tragen zum Schluß die so erhaltenen Werte über der Zahl der eingeschalteten Funkenstrecken auf. Diese Kurve stellt dann die berechnete Überschlagscharakteristik dar. In Abb. 7 sind die so berechneten Überschlagscharakteristiken für $\frac{c}{C} = 1, \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{20},$

$\frac{1}{40}$ und $\frac{1}{\infty}$, also die Schar der Normalkurven, wie wir sie nannten, dargestellt.

Der Vorteil der graphischen Methode zur Berechnung der Spannungsverteilung besteht darin, daß $\frac{c}{C}$ der einzelnen Elektroden

verschieden sein kann.

Nehmen wir z. B. an, daß die Kapazität zwischen a und b, also C_{ab} doppelt so groß sei, wie die andern Kapazitäten C, so können wir die Spannungsverteilung auf folgende Weise finden:

In Abb. 4 ist $C_{ab} = OK'$ eingetragen. Die Strecken $e(F), f'(G), g'(H)$ usf. stellen dann die Spannungen P_{ab} dar und wir haben zu bilden

$$\frac{d(F)}{e(F)}, \frac{f(G)}{f'(G)}, \frac{g(H)}{g'(H)} \text{ usf.}$$

¹⁾ Bei der praktischen Ausführung der Versuche gehen wir natürlich anders vor; es werden alle Kugeln gleich so aufgelegt, wie Abb. 6 zeigt, und der Anschluß mit Erde wandert von der zweiten Kugel ab nach rechts. Bei obiger Beschreibung wurde absichtlich die Versuchsmethode gewählt, bei welcher das Kugelpaar verschoben wird, an dem der Überschlag erfolgt, da auch im Diagramm die diesen Kugeln entsprechenden Größen nach oben wandern.

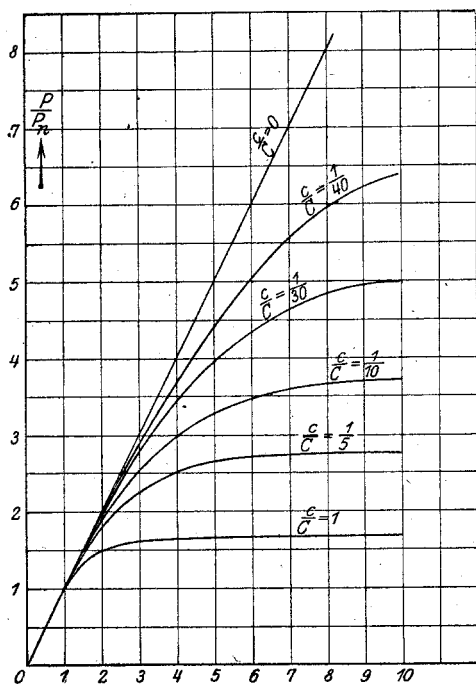


Abb. 7.

Tragen wir diese Werte abhängig von der Zahl der eingeschalteten Funkenstrecken auf, so erhalten wir die Kurve b der Abb. 8. Diese Kurve liegt wesentlich höher als die Kurve a, welche die Normalkurve für $\frac{c}{C} = \frac{1}{5}$ ist, und deckt sich mit keiner der Normalkurven. Andererseits würde die Kurve b tiefer liegen als die Kurve a, wenn wir C_{ab} kleiner als die übrigen C angenommen hätten. Zum gleichen Resultat gelangt man, wenn man C ungeändert läßt und c ändert (einem größeren C entspricht ein kleineres c und umgekehrt). Es bedarf wohl nur der Erwähnung, daß das Diagramm auch für den Fall konstruiert werden kann, wenn alle C und c voneinander verschieden sind.

Wir haben die Überschlagscharakteristik ermittelt unter der Voraussetzung, daß der Eintritt des Überschlages an der Funkenstrecke, wo die größte Spannungsdifferenz herrscht, scharf erkannt werden kann. Bei manchen Anordnungen ist der Unterschied in den Spannungsdifferenzen benachbarter Funkenstrecken jedoch so gering, daß der Eintritt und die Stelle des ersten Überschlages nicht exakt beobachtet werden kann. In solchen Fällen ist es zweckmäßig, an einer Funkenstrecke, nämlich an der, wo man den Überschlag wünscht, eine Einrichtung anzubringen, die bewirkt, daß diese Funkenstrecke bei geringerer Spannung als die anderen anspricht. Bei Kugelfunkenstrecken kann man, wie der Verfasser ausprobiert hat, die Überschlagsspannung einer Funkenstrecke dadurch herabsetzen, daß man an einer der beiden Kugeln dieser Funkenstrecke eine Nähnadelspitze von etwa 0,1 bis 0,2 mm Länge anbringt. Auf diese Weise bekommt man dann sehr scharf einsetzende Entladungen. Natürlich darf durch solche Einrichtungen an den Kapazitätsverhältnissen der Anordnung nichts geändert werden.

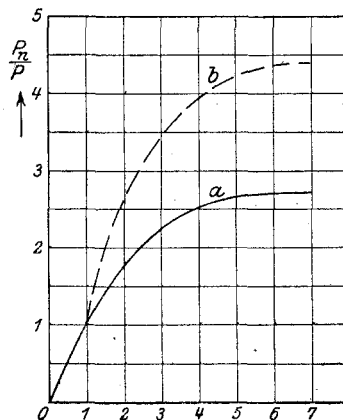


Abb. 8.

Außerdem bietet eine solche Funkenstrecke noch folgende Vorteile. Man kann diese Funkenstrecke auch an einer anderen Stelle als dort, wo die größte Spannung herrscht, also etwa in der Mitte oder aber am Ende der Kugelreihe (also auf den Röhren R_1 und R_2) anordnen. Im letztgenannten Fall ist die Überschlagscharakteristik identisch mit der Charakteristik der Spannungsverteilung, man kann also auf diese Weise die Spannungsverteilung selbst direkt gewinnen, was in vielen Fällen wertvoll ist. Im allgemeinen empfiehlt es sich aber, die Funkenstrecke immer an der Stelle der höchsten Spannung anzuordnen; erstens braucht man dann nicht mit so hohen Spannungen zu arbeiten und zweitens werden die Versuchsergebnisse viel genauer, wie der Verfasser durch Versuche festgestellt hat und wie sich auch an Hand des Diagrammes nachweisen läßt. Bei den im folgenden mitgeteilten Versuchen¹⁾ war die Funkenstrecke immer an der Stelle der höchsten Spannung angeordnet.

3. Kugelvielfachfunkenstrecke. Für das Studium der Erscheinungen empfiehlt es sich, wie bereits erwähnt wurde, Versuche an einem möglichst einfachen Modell mit wohldefinierten Elektroden vorzunehmen. Besonders geeignet hierfür ist eine Kugelvielfachfunkenstrecke, die ähnlich gebaut ist, wie die Skizze Abb. 6 zeigt. Die Dimensionen einer solchen vom Verfasser benutzten Anordnung sind:

Porzellanröhren: Länge 400 mm; Durchmesser außen 16 mm, innen 8 mm,
Messingkugeln: Durchmesser 50 mm. Zahl der Kugeln 20.

¹⁾ Meinem Assistenten, Herrn Dipl.-Ing. Wörner, bin ich für die Unterstützung bei den Versuchen zu Dank verpflichtet.

Die Kugeln werden auf die oben konisch ausgeschliffenen Porzellanröhren ohne weitere Befestigung aufgelegt. Der Abstand der Kugeln voneinander kann beliebig eingestellt werden, bei den im folgenden beschriebenen Versuchen wurde ein Abstand von 1 mm zwischen je zwei Kugeln gewählt.

In die Kugel a wurde eine Nähnadel so weit versenkt, daß die Spitze derselben etwa 0,2 mm aus der Kugel herausragte. Diese Kugel wurde so aufgelegt, daß die Spitze immer der Kugel b gerade gegenüber stand. Auf diese Weise wurde erreicht, daß der Durchschlag zwischen den beiden ersten Kugeln bei einer recht niedrigen Spannung einsetzt. (Die Dimensionen der Spitze sind so gering, daß dadurch die Kapazität C der beiden ersten Kugeln kaum beeinflusst wird.)

Bei der ersten Versuchsreihe wurden sämtliche Kugeln aufgelegt und zunächst alle Funkenstrecken mit Ausnahme der ersten durch kleine Stanniolblättchen, die zwischen die Kugeln eingeschoben wurden, überbrückt. Die Zuleitungen L_1 und L_2 blieben stets ungeändert, sie waren auf ein langes Stück horizontal in Richtung der Kugelreihe geführt. In die Leitung L_2 wurde ein großer Widerstand eingeschaltet, um möglichst zarte Entladungen zu erhalten. Der Transformatorpol, an den die Leitung L_2 angeschlossen war, wurde geerdet.

Die Eichung der ersten Funkenstrecke ergab eine Überschlagnspannung von 1450 bis 1500 Volt.

Die Versuche wurden in der Weise durchgeführt, daß zunächst das Stanniolblättchen, welches die Funkenstrecke 2 überbrückte, entfernt und dann die Spannung so hoch gesteigert wurde, bis an der ersten Funkenstrecke der Überschlag erfolgte. Dann wurde die dritte, vierte . . . Funkenstrecke freigegeben. Bei jedem Versuch wurde natürlich auch die Gesamtspannung aller Funkenstrecken gemessen.

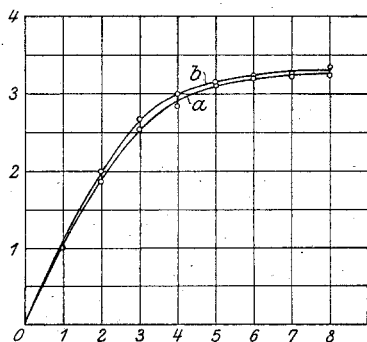


Abb. 9.

Das Versuchsergebnis ist durch die Kurve a Abb. 9 dargestellt, und zwar sind die Spannungen als Vielfaches der Überschlagnspannung der ersten Funkenstrecke aufgetragen.

Man zeichnet diese Kurve auf ein Pauspapier und legt dieses auf die Kurvenschar der Normalüberschlagscharakteristiken (Abb. 7). Man sieht, daß sich die gefundene Kurve mit der Normalkurve gleich 0,1 ungefähr deckt. Ganz genau stimmen die Formen der beiden Kurven nicht miteinander überein, der obere Teil der experimentell gefundenen Kurve liegt etwas tiefer als die Normalkurve.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurden immer die bei der Messung nicht benötigten Kugeln abgelegt. Die Zuleitung L_1 blieb unverändert, die Zuleitung L_2 wurde nach Bedarf in Richtung der Kugelreihe verlängert. Die Versuchsergebnisse sind durch Kurve b Abb. 9 dargestellt. Sie liegt etwas höher als die Kurve a, aber ein wesentlicher Unterschied in der Form besteht nicht. Daraus folgt, daß tatsächlich nur die Kapazitäten gegen die Nachbarkugeln und gegen Erde die Spannungsverteilung bestimmen.

Das Resultat besagt, daß man die Anordnung mit einer für die praktischen Verhältnisse hinreichenden Genauigkeit als Kondensatorgruppe auffassen kann, deren Elektroden das Kapazitätsverhältnis $\frac{C}{C} = 0,1$ besitzt. Durch Veränderung des Abstandes der einzelnen Kugeln voneinander und durch Anbringung künstlicher Erden in der Nähe der Kugeln kann man leicht ermitteln, wodurch die kleinen Abweichungen der Kurve von der Normalkurve bedingt sind. Wir werden bei einer anderen Anordnung derartige Versuche anstellen; es soll deshalb hier nicht näher darauf eingegangen werden.

Wir kommen nunmehr zu einer neuartigen Aufgabe, zur experimentellen Bestimmung der Kapazitätsverhältnisse einer Spule. Die Aufnahme der Überschlagscharakteristik von Spulen scheint daran zu scheitern, daß die einzelnen Windungen einer Spule miteinander in leitender Verbindung sind; auf einen Kondensator übertragen heißt das, daß die beiden Belege desselben miteinander verbunden, also kurzgeschlossen sind.

Nun ist aber durch die Untersuchungen über das Verhalten von Spulen beim Anprall von Sprungwellen festgestellt worden, daß im ersten Augenblick kein Strom durch den Draht der Windungen fließt, sondern lediglich ein Strom quer zu den Windungen, d. h. vom Draht einer Windung durch die Isolation zum Nachbardraht usw., kurz die Spannungsverteilung stellt sich genau so ein, als wenn die Spule aus Ringen bestände, die voneinander isoliert sind. Wir können also die Spannungsverteilung für Spulen an einem Modell studieren, das aus Ringen besteht, die, ohne miteinander in leitender Verbindung zu sein, neben oder übereinander aufgeschichtet sind in genau derselben Anordnung wie die Windungen der wahren Spule. Natürlich müssen die Ringe auch im übrigen die gleichen Dimensionen und Isolationsverhältnisse aufweisen wie die Windungen der wahren Spule.

Bei Transformatoren können wir jede Spule für sich als einen Ring betrachten und die Spannungsverteilung auf die Spulen ermitteln, indem wir die Verbindungen zwischen den einzelnen Spulen lösen. Wenn man die Spannungsverteilung auf die einzelnen Windungen einer Spule oder auf die einzelnen Windungslagen messen will, so muß man natürlich die Verbindungen zwischen den einzelnen Windungen bzw. den einzelnen Windungslagen trennen.

Im folgenden sind die Ergebnisse einiger Versuche, die an einer Schutzspule (zylindrische Spirale) und an einem Transformator ausgeführt wurden, niedergelegt.

4. Schutzspulen. Das Modell der Schutzspule war folgendermaßen aufgebaut. Ein Holzstäbchen war horizontal angeordnet; in das Stäbchen waren im Abstand von je 1 cm Kerben geschnitten, die mit Isolationsmaterial gefüllt waren. An dem Stäbchen wurden 10 Stück in sich geschlossene Kupferringe (16 cm Durchmesser) aus 4,2 mm starkem Draht aufgehängt, und zwar so, daß sie in den Kerben lagen. Je nach der Entfernung der Ringe voneinander stellt das Modell eine Schutzspule mit einer Ganghöhe von 1, 2, 3 cm dar.

Am ersten Ring war eine feine Nähnadel so befestigt, daß ihre Spitze dem zweiten Ring gegenüberlag mit einem Luftabstand von einigen Zehnteln Millimeter.

Bei den Versuchen wurde genau so vorgegangen wie bei der Kugelvielfachfunkenstrecke: Es wurde zuerst die Funkenstrecke geeicht und dann die Spannung am ersten und dritten, ersten und vierten Ring usw. angelegt und jeweils so hoch gesteigert, bis der Überschlag an der Funkenstrecke einsetzte. Der erste Ring war mit dem ungeerdeten Pol des Transformators verbunden.

Das Versuchsergebnis ist in Abb. 10 dargestellt.

Kurve a stellt die Überschlagscharakteristik einer Spule mit der Ganghöhe von 2 cm dar. Sie deckt sich ungefähr mit der Normalkurve $\frac{c}{C} = \frac{1}{5}$.

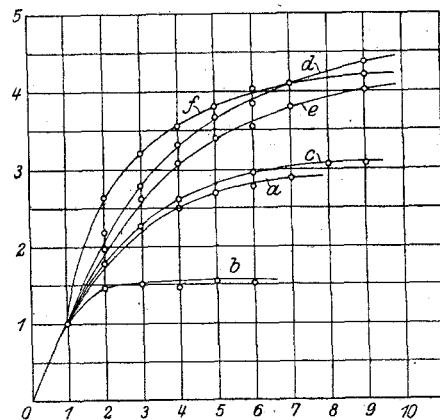


Abb. 10.

Um den Einfluß der Entfernung der Spule von Erde festzustellen, wurde eine geerdete Platte in ca. 10 mm Abstand unterhalb der Spule angeordnet. Es ergab sich dann die Kurve b mit einem $\frac{c}{C}$ von ungefähr 1, und zwar deckt sich diese Kurve recht gut mit der entsprechenden Normalkurve.

Um den Einfluß der Ganghöhe zu ermitteln, wurde der Zwischenraum zwischen den Ringen zu 3 cm gewählt. Es ergab sich die Kurve c, die etwas oberhalb der Kurve a liegt und sich mit der Normalkurve $\frac{c}{C} = \frac{1}{6}$ decken dürfte. Daraus ist ersichtlich, daß die Ganghöhe bei dieser Art der Anordnung keinen wesentlichen Einfluß auf das Verhältnis $\frac{c}{C}$ ausübt. Merkwürdig ist, daß die Kurve oberhalb

Kurve a liegt. Durch das Auseinanderrücken der Ringe wird C verkleinert, man sollte also erwarten, daß die Kurve für die größere Ganghöhe unterhalb der Kurve a liegt. Wahrscheinlich wird c durch das Auseinanderrücken der Ringe vergrößert.

Kurve d stellt die Überschlagscharakteristik dar für den Fall, daß die ersten beiden Ringe 1 cm, die übrigen je 2 cm voneinander entfernt sind. Es sollte sich eine ähnliche Kurve wie Kurve b in Abb. 8¹⁾ einstellen. Jedoch ist der Knick nicht so scharf ausgeprägt wie bei dieser Kurve. Wie der vorhergehende weist auch dieser Versuch darauf hin, daß auch die Kapazitäten der einzelnen Ringe gegen Erde verändert worden sind. Es wurde nun versucht festzustellen, ob eine Ungleichheit in den Erdkapazitäten besteht und wie sie kompensiert werden kann. Schräg unter den Ringen wurde bei sonst ungeänderter Anordnung ein geerdeter Eisenstab so angebracht, daß er vom letzten Ring ca. 1 cm und vom ersten ca. 30 cm entfernt war. Es ergab sich dabei Kurve e. Diese hat die gleiche Form wie die Kurve d, sie liegt nur etwas tiefer, was leicht erklärlich ist. Der Umstand, daß die Kurve die gleiche Form aufweist, läßt darauf schließen, daß die Erdkapazitäten auch bei Nichtvorhandensein der geerdeten Stange gegen den letzten Ring hin zunehmen.

Danach wurde die Stange so angeordnet, daß sie vom ersten Ring ca. 1 cm und vom letzten ca. 30 cm entfernt war. Es ergab sich die Kurve f, die eine wesentlich verschiedene Form aufweist und den gleichen Charakter zeigt wie die Kurve b der Abb. 8. Bei dieser Anordnung der geerdeten Stange sind also die Ungleichheiten der Erdkapazitäten ziemlich kompensiert.

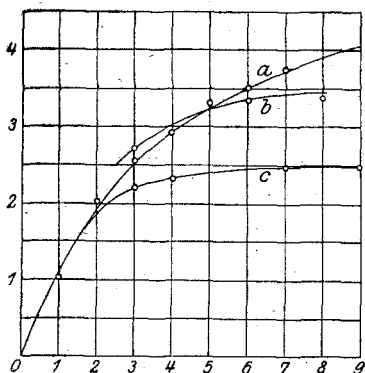


Abb. 11.

Dieses Ergebnis ist sehr interessant. Wir erhalten einen Fingerzeig, wie man Aufschluß über die wahren Werte von C und c erhalten kann und wie man durch verschiedene Formgebung der künstlichen Erde eine andere Spannungsverteilung auf die Ringe erzwingen kann.

Es liegt die Vermutung nahe, daß durch das Holzstäbchen, das ja auch eine künstliche Erde darstellt, die Spannungsverteilung wesentlich beeinflußt wird. Die Ringe wurden deshalb bei den weiteren Versuchen von dem Holzstäbchen abgenommen und vertikal übereinander geschichtet. Als Distanzstücke zwischen je 2 Ringe wurden Porzellan-klötzchen benützt¹⁾. Das ganze Modell wurde 10 cm

über der Erde angeordnet. In Abb. 11 ist das Versuchsergebnis dargestellt.

Kurve a gilt für eine Ganghöhe der Spule von 1 cm, Kurve b für eine solche von 2 cm und Kurve c für eine Ganghöhe von 2 cm und bei Anordnung einer künstlichen Erde (vertikale Platte) im Abstand von 1 cm von den Ringen.

¹⁾ Man kann natürlich noch andere Aufhängevorrichtungen der Spulen anwenden. Praktisch wird man natürlich eine solche wählen, welche die Kapazitätsverhältnisse möglichst wenig ändert.

Die Kurven a und b decken sich ungefähr mit der Normalkurve $\frac{c}{C} = \frac{1}{10}$, die Spannungsverteilung ist also verbessert worden; die Vermutung, daß das Holzstäbchen eine künstliche Erde darstellt, wurde also bestätigt. Der Einfluß der Ganghöhe ist auch hier nicht sehr groß. Merkwürdig ist die Lage der Kurve b gegenüber der Kurve a; man kann sie natürlich wieder auf den Einfluß der Verschiedenheit in der Erdkapazität zurückführen.

Durch Anordnung einer künstlichen Erde wurde der Wert $\frac{c}{C}$ der Anordnung von ca. $\frac{1}{10}$ auf $\frac{1}{5}$ gebracht, wie Kurve c zeigt.

Bei Durchführung der Versuche wurde beobachtet, daß jede Veränderung in der Umgebung der Spule Einfluß auf das Ansprechen der Meßfunkenstrecke hat, ein Zeichen dafür, daß sich das Verhältnis $\frac{c}{C}$ der Anordnung geändert hat. Es muß deshalb strenge darauf geachtet werden, daß auch der Beobachter seinen Standort der Spule gegenüber während einer Versuchsreihe nicht ändert. Am besten ist es natürlich, die Spule durch künstliche Erden abzuschirmen. Dadurch wird freilich die Erdkapazität der einzelnen Elektroden vergrößert. Will man trotzdem ein kleines $\frac{c}{C}$, dann müssen die Windungen ganz nahe beieinander angeordnet werden; sehr zweckmäßig dürfte es sein, als Isolationsmaterial zwischen den Windungen nicht Luft, sondern ein Material mit größerer Dielektrizitätskonstante zu wählen.

5. Transformatorspulen. Als Versuchstransformator diente der 32000 Volttransformator des Hochspannungslaboratoriums, 15 kVA, dessen Hauptmaße aus der Abb. 12 zu ersehen sind. Auf jedem der beiden Schenkel sind 16 Hochspannungsspulen aufgeschichtet. Die Enden jeder Spule sind zu Isolatoren herausgeführt, um den Transformator beliebig schalten zu können. Unter die Klemme, die mit dem Anfang der Spule 1 verbunden ist, und unter die Klemme des Windungsanfangs der Spule 2 wurde je eine Elektrode mit

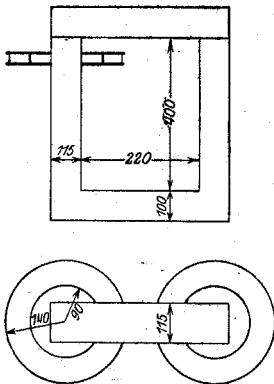


Abb. 12.

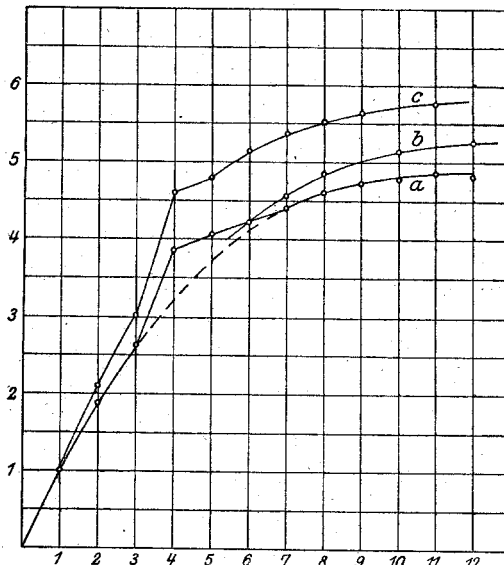


Abb. 13.

eingeklemmt, und zwar so, daß zwischen den Elektroden ein kleiner Luftraum war. Die beiden Elektroden bildeten die Meßfunkenstrecke. Als Elektroden wurden gewählt: a) 2 Nähnadeln; b) 2 Kugeln (Durchmesser 10 mm); c) versuchsweise wurde statt der Funkenstrecke auch ein Braunsches Elektrometer mit dem Meßbereich von 1500 Volt eingeschaltet.

Die Kapazität der Kugelfunkenstrecke beträgt 0,677 cm, die des Elektrometers wurde beim Zeigerausschlag von 1500 Volt zu ca. 8 cm gemessen.

Die Versuchsergebnisse sind durch die Kurven a, b und c der Abb. 13 dargestellt.

Wenn die Kapazitäten aller Meßanordnungen gegenüber der Kapazität des ersten Spulenpaares verschwindend klein wären, müßten alle drei Kurven zusammenfallen. Das ist nicht der Fall, die Kapazitäten des Voltmeters und der Kugelfunkenstrecke beeinflussen wesentlich die Lage der Durchschlagscharakteristiken, in welcher Weise, ist uns bereits bekannt¹⁾. (Bei Verwendung des Elektrometers wurde die Spannung stets so hoch gesteigert, bis das Voltmeter den Ausschlag 1500 Volt zeigte.) Die Kurve b (Kugelfunkenstrecke) liegt etwas tiefer als die Kurve c. Die Kurve a dürfte die richtige Überschlagscharakteristik darstellen. Danach besitzt der Transformator ein $\frac{c}{C}$ von ca. $\frac{1}{20}$. Auffallend ist, daß die Kurven der Überschlagnung

einen Knick aufweisen. Es wurden zur Aufklärung dieser Erscheinung die Kapazitäten aller Spulenpaare mit der des ersten Paares verglichen und da zeigte sich, daß die Kapazitäten zwischen Spule 4 und 5 von der zwischen Spule 1 und 2 verschieden sind, und zwar ist $(C + c)$ dieser Spulen wesentlich kleiner. Daraus können wir schließen, daß auch die Spannungsverteilung einen Sprung aufweist, was natürlich nicht erwünscht ist. Manche Transformatorüberschläge, die nicht bei der Eingangswindung erfolgten, dürften darin ihre Erklärung finden, daß die Kapazitäten einzelner Spulen stark voneinander abweichende Werte zeigen. Die Aufnahme der Überschlagscharakteristik, die solche Fehler aufdeckt, dürfte sich also für jeden Transformator nach dem Zusammenbau der Spulen empfehlen. Dies kann sehr leicht und ohne Gefährdung des Transformators geschehen, da ja nur geringe Spannungen hierzu erforderlich sind. Die höchste bei den beschriebenen Messungen verwendete Spannung stieg nicht über 5000 Volt. Je nach dem Einstellen der Meßfunkenstrecke kann man noch tiefer gehen.

Es bedarf wohl nur der Erwähnung, daß man durch Parallelschalten bekannter Kapazitäten zum ersten Spulenpaar und durch Nachrechnen der Meßergebnisse die Absolutwerte von C und c der einzelnen Spulen ermitteln kann.

6. Zusammenfassung. Die Versuche haben die Zulässigkeit der Annahme, daß die Spannungsverteilung an Spulen dem Gesetz

$$P_n = P \frac{\sin \alpha \cdot n}{\sin \alpha \cdot z}$$

folgt, bestätigt. (Für Hängeisolatoren wurde dieses Gesetz bereits von Petersen experimentell bestätigt.)

Die Versuche wurden allerdings mit stationären Wechselspannungen angestellt, und es besteht noch die Frage, ob die gleiche Spannungsverteilung auch beim Aufprall von Sprungwellen eintritt. Dies wird sicher der Fall sein, wenn die ganze erste Windung der Spule sofort die Spannung der Sprungwelle annimmt. Dies widerspricht aber der Erkenntnis, daß im ersten Augenblick nur ein Strom quer zu den Windungen auftreten kann und der Strom durch den Draht der Windungen gleich Null sein muß. Tatsächlich liegt hier eine Unstimmigkeit bzw. Unzulänglichkeit der Ersatzschaltung der Spule vor. Wir können aber die Forderung, daß die erste Windung im ersten Augenblick sofort die Spannung der Sprungwelle annimmt, praktisch erfüllen, wenn wir mehrere Punkte der ersten Windung von Schutzspulen und Transformatoren mit der Zuleitung verbinden, was sich auch bei praktischen Ausführungen von solchen Spulen empfehlen dürfte.

Für die Arbeit standen die Mittel aus der Arnold-Stiftung zur Verfügung.

¹⁾ Die Erkenntnis, daß die Form der Charakteristik wesentlich verändert wird, wenn der Wert c und C der ersten Kondensatoren auch nur wenig von den Werten der übrigen Kondensatoren abweicht, ist sehr wertvoll für die Beurteilung, ob die Meßeinrichtung genügend kleine Kapazität besitzt.