

**4. Über den Energieverlust im Dielektrikum
in wechselnden elektrischen Feldern;
von Bruno Monasch.**

(Auszug aus der Danziger Dissertation.)

Der Energieverlust, der in festen und flüssigen Dielektrizis stattfindet, wenn sie sich in einem periodisch sich ändernden elektrischen Felde befinden, bietet heute in gleicher Weise physikalisches und technisches Interesse. Über die Ursache des Verlustes stehen einander im wesentlichen zwei Ansichten gegenüber. Die eine will den Verlust oder wenigstens einen Teil desselben molekularen Reibungsvorgängen und einem dadurch verursachten Zurückbleiben der elektrischen Induktion hinter der Intensität des vorhandenen elektrischen Feldes zuschreiben, erblickt also in ihm ein vollständiges Analogon zu dem in ferromagnetischen Körpern beobachteten Verlust durch magnetische Hysterese. Die andere sucht ihn durch das Vorhandensein irgendwelcher Leitungserscheinungen, etwa elektrolytischer Art oder als eine besondere Form eines in einem Widerstande stattfindenden Verlustes zu erklären, wie dies z. B. mit Hilfe der mehrfach dazu herangezogenen Maxwell'schen Anschauung vom geschichteten Dielektrikum ausführbar ist.¹⁾ Die experimentellen Untersuchungen, die sich mit der Hysteresefrage befaßten, waren durch die mit der Rückstandsbildung zusammenhängenden viskosen Vorgänge, die sich bei den weitaus meisten Dielektrizis zeigen, sehr erschwert und ergaben, soweit sie sich den Nachweis einer rein statischen Hysterese in dem Sinne eines von der Änderungsgeschwindigkeit des Feldes unabhängigen Vorganges zum Ziele gesetzt hatten, meist ein negatives Resultat.²⁾ Ein Experimentator

1) A. Heß, Journ. de phys. (3) 1. p. 459. 1892; J. Hanauer, Wied. Ann. 65. p. 789. 1898; H. A. Rowland u. T. D. Penniman, Johns Hopkins University Circulars. Baltimore 17. p. 52. 1898.

2) A. W. Porter u. D. K. Morris, Proc. of Roy. Soc. 57. p. 469. 1895; F. Beaulard, Journ. de phys. (3) 9. p. 422. 1900.

jedoch, v. Hoor¹⁾, berichtet von Versuchen an einem besonders präparierten Papier, bei denen es ihm gelungen ist, eine regelrechte statische Hysteresis, also einen pro Zyklus konstanten Verlust, auch bei ganz langsam durchgeführtem elektrischen Kreisprozeß zu erkennen.

Man kann sich aber auch, wie dies bei dem größeren Teil der bisherigen experimentellen Untersuchungen der Fall war, ohne zunächst eine bestimmte Anschauung über die Natur des Verlustes zur Richtschnur zu nehmen, die Aufgabe stellen, die Gesetze zu ermitteln, die der Verlust in wechselnden oder rotierenden elektrischen Feldern überhaupt befolgt. Die Resultate dieser Untersuchungen sind, besonders was den Einfluß der Feldintensität auf den Verlust betrifft, außerordentlich ungleich und einander widersprechend. In bezug auf die Art der Abhängigkeit des Verlustes von der Spannung oder Feldintensität kommen mehrere Forscher zu dem Ergebnis, daß der Verlust bei geringeren Feldintensitäten annähernd proportional dem Quadrate der Feldintensität zunehme, wie dies als Erster schon Borgmann²⁾ 1886 vermutet hatte, in stärkeren Feldern jedoch schneller als mit dem Quadrate der Feldintensität wachse. Doch finden sich auch ebensovielen hiervon gänzlich abweichende Angaben über den Exponenten der Feldintensität in der den Verlust durch die Feldintensität ausdrückenden Gleichung. Als Grenzwerte dieses Exponenten erscheinen die Zahlen $1,5^3)$ und $3^4)$, doch sind auch die verschiedensten Abstufungen zwischen diesen Grenzen vertreten. Da ferner gerade in neuester Zeit mehrfach die Ansicht ausgesprochen worden ist, der Verlust lasse sich überhaupt nicht als proportional einer Potenz der Feldintensität mit konstantem Exponenten ausdrücken⁵⁾, kann man wohl nicht behaupten,

1) M. v. Hoor, *Elektrotechn. Zeitschr.* 22. pp. 170, 187, 213, 716, 749 u. 781. 1901.

2) J. Borgmann, *Journal d. russ. physik.-chem. Gesellsch.* (1) 18. p. 1. 1886.

3) R. Threlfall, *Phys. Review* 4. p. 457; 5. p. 21 u. 65. 1897; R. Arno, *Rend. della R. Acc. dei Lincei* (5) 1. 2. Sem. p. 284. 1892; 2. 1. Sem. p. 341; 2. Sem. p. 260. 1893; 3. 1. Sem. p. 272, 585; 2. Sem. p. 294. 1894.

4) P. Holitscher, *Elektrotechn. Zeitschr.* 24. p. 635. 1903.

5) J. Moscieki, *Elektrotechn. Zeitschr.* 25. p. 549. 1904.

daß wir heute bereits imstande seien, uns ein abschließendes Urteil über die Art des Zusammenhanges zwischen dem Energieverlust im Dielektrikum und der Intensität des elektrischen Feldes zu bilden. Bemerkt sei nur noch, daß alle jene Anschauungen, welche den Verlust, als durch irgend eine Form von Leitung verursacht, erklären wollen, seine genaue Proportionalität mit dem Quadrate der Spannung bez. Feldintensität zur notwendigen Voraussetzung haben.

Auch für die Technik, insbesondere für zwei ihrer Gebiete, die drahtlose Telegraphie und die Kabeltechnik, besitzt die Kenntnis des Energieverlustes im Dielektrikum von Kondensatoren und Kabeln und seiner Gesetze Wichtigkeit. Es erscheint demnach nicht ohne Interesse, zu untersuchen, ob gerade das Quadratgesetz für die Abhängigkeit des dielektrischen Verlustes von der Spannung oder von der elektrischen Feldintensität als genau gültig angesehen werden kann oder nicht, und im letzteren Falle die Größe der Abweichungen von diesem Gesetze festzustellen, wenn sich eine Methode finden läßt, die hierzu besser als die bisher benutzten geeignet ist. Eine solche Methode, die außerdem noch einige andere Vorzüge aufweist und auf die mich Hr. Prof. Dr. M. Wien aufmerksam machte, ist nebst ihrer Anwendung im folgenden beschrieben.

A. Die Methode.

I. Die Methode und ihre prinzipiellen Eigenschaften.

Die Methode besteht in der Nulleinstellung in der in Fig. 1 dargestellten Brückenordnung¹⁾, die bisher zur Kapazitätsmessung, sowie auch zum Studium der Änderung der Dielektrizitätskonstante mit der Schwingungszahl²⁾ benutzt worden ist. In unserem Falle haben die vier Brückenseiten folgende Bedeutung: Die Seite AD enthält den Kondensator, dessen Verlust bestimmt werden soll. Wir können ihn hier in der Brücke, ohne zunächst über die Natur des Verlustes irgendwelche Voraussetzung zu machen, immer durch einen verlustlosen Kondensator mit der Kapazität c_1 ersetzt denken,

1) M. Wien, Wied. Ann. 44. p. 689. 1891.

2) J. Hanauer, l. c.

dem ein reiner, d. h. kapazitäts- und induktionsloser Widerstand w_1 parallel geschaltet ist. Diese Substitution ist deshalb

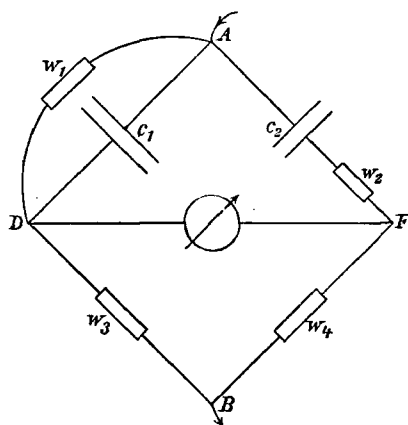


Fig. 1.

unter allen Umständen zulässig, weil es sich ja nur darum handelt, den Phasenunterschied zwischen der Spannung an und dem Strome in der Brückenseite AD darzustellen. In der Seite AF befindet sich ein verlustloser Kondensator von der Kapazität c_2 mit einem davor geschalteten reinen Widerstande w_2 , in den Seiten BD und BF reine Widerstände w_3 und w_4 .

Alle Widerstände seien im folgenden durchgehends in Ohm, alle Kapazitäten, wo nicht ausdrücklich anderes bemerkt ist, in Farad eingeführt. Von den sonst noch vorkommenden Bezeichnungen bedeute:

- n die Anzahl ganzer Schwingungen des benutzten Wechselstromes in 2π Sekunden;
- E den Effektivwert der Spannung an der Brückenseite AD in Volt;
- A die in der Seite AD (dem untersuchten Kondensator) verbrauchte Leistung in Watt;
- ψ das Komplement des Phasenverschiebungswinkels zwischen Strom und Spannung am untersuchten Kondensator.

Gegenüber der ebenfalls anwendbaren Parallelschaltung von c_2 und w_2 hat die hier benutzte Anordnung vor allem den praktischen Vorteil, daß man bei ihr mit viel kleineren Werten des Widerstandes w_2 auskommt.¹⁾ Die Stromlosigkeit des Brückenzweiges erfordert hier unter Voraussetzung reinen Sinusstromes die Erfüllung der beiden Bedingungen

$$(1a) \quad n^2 c_1 c_2 w_1 w_2 = 1$$

und

$$(1b) \quad \frac{c_1}{c_2} = \frac{w_4}{w_3} - \frac{w_2}{w_1},$$

1) Vgl. auch J. Hanauer, l. c., wo auch der „wirksame Widerstand“ w_1 der dort untersuchten Dielektrika berechnet ist.

und man muß daher, um die Messung auszuführen, entweder c_2 und das Verhältnis w_3/w_4 , oder w_2 und w_3/w_4 , oder c_2 und w_2 so lange verändern, bis $D F$ stromlos ist.

Aus den beiden Gleichungen (1a) und (1b) sollen nun einige Schlüsse gezogen werden:

1. *Quadratgesetz.* — Eliminiert man aus ihnen c_1 , so erhält man für w_1 den Ausdruck

$$w_1 = \frac{1 + n^2 c_2^2 w_2^2}{n^2 c_2^2 w_2} \cdot \frac{w_3}{w_4}.$$

Die in $A D$ verbrauchte Leistung ist dann

$$(2) \quad A = \frac{E^2}{w_1} = \frac{n^2 c_2^2 w_3}{1 + n^2 c_2^2 w_2^2} \cdot \frac{w_4}{w_3} \cdot E^2 \text{ Watt.}$$

Der Faktor von E in Gleichung (2) bleibt bei sich änderndem E nur dann konstant, wenn A , also der Verlust in dem zu untersuchenden Kondensator, dem Quadrate der Spannung E genau proportional ist. *Da aber die Konstanz dieses Faktors nach den Gleichungen (1a) und (1b) das Stromlosbleiben des Brückenzweiges bedingt, besitzt man also in dieser Methode ein sehr geeignetes und sicheres Mittel, um gerade die Gültigkeit des Quadratgesetzes für die Abhängigkeit des Verlustes A von der Spannung E zu prüfen. Nur bei genauer Gültigkeit des Gesetzes zeigt das Brückeninstrument, nachdem die Brücke einmal ins Gleichgewicht gebracht worden ist, auch dann keinen Strom an, wenn man die Spannung ändert.*

Die Gleichung (2) ist nicht genügend durchsichtig, um auf den ersten Blick erkennen zu lassen, wie groß die Änderungen der Brückeneinstellung bei einer angenommenen Abweichung vom Quadratgesetze sein müßten. Ich habe deshalb die nachstehende Tab. 1 berechnet, der folgende, den wirklich ausgeführten Messungen entsprechende Voraussetzungen zugrunde liegen: Die Brücke wäre bei 1000 Volt mit den Werten $n = 538,0$, $w_3 = w_4$, $c_2 = 2,3 \cdot 10^{-4}$ Mikrof., $w_2 = 100\,000 \Omega$ zum Einstehen gebracht worden. Die Tabelle gibt die Werte an, die w_2 , das natürlich konstant bleibt, sobald das Quadratgesetz genau erfüllt ist, annehmen müßte, wenn der Verlust proportional der 2,1^{ten} Potenz der Spannung wachsen würde. Die Zunahme, die w_2 hier mit steigender Spannung aufweist, muß als sehr erheblich bezeichnet werden, wenn man in Betracht

zieht, daß die Empfindlichkeit der Einstellung bei den ausgeführten Messungen gewöhnlich derart war, daß bei 2000 Volt Änderungen von w_2 um 1500—2000 Ohm, bei 8000 Volt aber solche von weniger als 1000 Ohm mit Sicherheit wahrnehmbar waren.

Tabelle 1.

E	w_2
1000	100 000
2000	107 140
4000	114 830
6000	119 580
8000	123 070

2. *Proportionalität des Verlustes mit der Kapazität.* — Noch etwas läßt sich aus Gleichung (2) ersehen: Aus (1a) und (1b) berechnet sich c_1 zu

$$c_1 = \frac{c_2}{1 + n^2 c_2^2 w_2^2} \cdot \frac{w_4}{w_3}.$$

Die hier im Nenner vorkommende GröÙe $1 + n^2 c_2^2 w_2^2$ ist in allen hier in Betracht kommenden Fällen von 1 sehr wenig verschieden. Sie beträgt z. B. in dem soeben betrachteten Beispiele 1,000153. Man kann also mit außerordentlich großer Annäherung setzen:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{w_4}{w_3}.$$

Diese vereinfachte Beziehung ist auch im folgenden durchweg zur Berechnung der Kapazität c_1 des zu untersuchenden Kondensators aus den Daten der Brücke herangezogen. Denken wir uns nun den genauen Ausdruck für c_1 in die Gleichung (2) eingesetzt.

Diese nimmt dann die Form an

$$(2') \quad A = n^2 c_2 w_2 \cdot c_1 E^2.$$

Hieraus folgt: *bleibt bei derselben Spannung und Schwingungszahl, aber verschiedenen Werten der Kapazität c_1 das Produkt $c_2 w_2$ unverändert, so ist der Verlust A proportional der Kapazität c_1 .*

3. *Kurvenform der Spannung.* — Es sollen nun die GröÙen c_2 und w_2 aus den Gleichungen (1a) und (1b) berechnet werden. Man erhält:

$$c_2 = \frac{1 + n^2 c_1^2 w_1^2}{n^2 c_1 w_1^2} \cdot \frac{w_3}{w_4} \quad \text{und} \quad w_2 = \frac{w_1}{1 + n^2 c_1^2 w_1^2} \cdot \frac{w_4}{w_3}.$$

Wie man sieht, enthält jeder dieser Ausdrücke die Schwingungszahl n . Da nun die Einstellung der Brücke nur so vorgenommen werden kann, daß entweder beide Größen c_2 und w_2 oder eine von ihnen und w_3/w_4 verändert werden, ergibt sich hieraus ein wichtiger Schluß: Die Brückeneinstellung ist für jede Schwingungszahl eine andere. Wird die Brücke also gleichzeitig von mehreren Strömen verschiedener Schwingungszahl durchflossen, so ist eine Nulleinstellung überhaupt nicht mehr möglich, es sei denn, daß man ein Brückeninstrument verwendet, das nur auf Ströme einer einzigen Schwingungszahl anspricht, das also gewissermaßen aus allen Strömen, welche die Brücke durchfließen, einen bestimmten herausfiltriert und zwar jenen, der eine ganz bestimmte Schwingungszahl aufweist. Diese Eigenschaft besitzt das optische Telephon¹⁾ von M. Wien, mit welchem die vorliegenden Untersuchungen ausgeführt wurden. Für dieses Instrument, somit auch für die Brückeneinstellung mit ihm, ist es genau so, als ob überhaupt nur die Grundschiwingung existierte, oder als ob zwischen den Punkten A und B eine reine Sinusspannung bestände. *Es wird also hier auch nicht der ganze in dem zu untersuchenden Kondensator wirklich auftretende Verlust gemessen, sondern nur jener, der durch die Grundschiwingung der Spannung an der Seite $A D$ verursacht ist, d. h. der stattfände, wenn nur die Grundschiwingung dieser Spannung, also eine reine Sinusspannung auf den Kondensator wirken würde.* Beim Vorhandensein einer Hysterese hätte man allerdings auch bei sinusförmiger Spannung mit dem Auftreten von Oberströmen zu rechnen. Auch in diesem Falle würde jedoch, wie sich leicht beweisen läßt (vgl. Dissert.), der durch die Grundschiwingung der Spannung verursachte Verlust richtig gemessen werden.

Der Erfüllung der Bedingung der reinen Sinusform der Spannung am untersuchten Kondensator nahe zu kommen, hat man sich zwar bei den bisher vorliegenden Untersuchungen über den Verlust im Dielektrikum mehrfach auf verschiedenen Wegen, wie durch Herstellung von Spannungsresonanz²⁾ und

1) M. Wien, Wied. Ann. **42**. p. 593. 1891; **44**. p. 631. 1891.

2) E. B. Rosa u. A. W. Smith, Phil. Mag. (5) **47**. p. 19. 1899; Ch. P. Steinmetz, Electrical World, New-York **37**. p. 1065. 1901.

durch Benutzung von Duddellströmen¹⁾ bemüht, doch ist sie, soviel ich weiß, noch niemals wirklich erreicht worden. Daß die Kurvenform den Verlust beeinflussen muß, unterliegt wohl heute keinem Zweifel mehr; es erhellt das daraus, daß der Verlust bei gleicher Spannung von der Schwingungszahl abhängt und zwar im allgemeinen mit der Schwingungszahl zunimmt. Man müßte deshalb, um wirklich definierte Resultate zu erhalten, entweder die Kurvenform genau feststellen, oder reine Sinusspannungen verwenden. Die Abhängigkeit des Verlustes von der Kurvenform der Spannung bildet übrigens auch bei der Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Verlust und Spannung eine Fehlerquelle, die bisher oft nicht genügend beachtet worden ist. Diese gerade bei Messungen an Kondensatoren keineswegs unwesentliche Fehlerquelle ist hier durch Verwendung des geeigneten Meßinstrumentes in der Brücke, wie gesagt, von vornherein umgangen.

II. Ausführung der Methode.

Bei der Ausführung dieser Methode und ihrer Anwendung auf den vorliegenden Zweck stößt man auf eine Reihe von Schwierigkeiten und Fehlerquellen, die um so größer werden, mit je höheren Spannungen und je kleineren Kapazitäten man arbeitet und die teils der Methode selbst eigentümlich sind, teils bei der Ermittlung des Energieverlustes im Dielektrikum überhaupt in Betracht kommen. Da man häufig gezwungen ist, kleine Kapazitäten bei hohen Spannungen zu messen, ist es vielleicht nicht unangebracht, auf diese Fehlerquellen, die zum Teil für die Verwendung von Kondensatoren überhaupt von Bedeutung sind, hier etwas näher einzugehen.

1. *Ladungserscheinungen im Brückenzeige.* — Eine Fehlerquelle, die sich, bevor sie erkannt wurde, besonders störend bemerkbar gemacht hatte, äußerte sich darin, daß bei Vertauschung der beiden Brückenseiten AD und AF gänzlich verschiedene Werte von c_2 und w_2 zur Nulleinstellung erforderlich waren, auch wenn die beiden Widerstände w_3 und w_4 einander genau gleichgemacht wurden. Sie hatte ihre Ursache in Ladungserscheinungen, die sich im Brückenzeige, speziell

1) O. M. Corbino, Il nuovo cimento (5) 9. p. 31. 1905.

in den Rollen des optischen Telephons abspielten. Besitzt dieser eine Kapazität c und befindet er sich auf einem Potentiale von der Amplitude V , so muß ihm ja ein Ladestrom von der Amplitude ncV zufließen, der die Fehler verursacht. Um diese Fehler klein zu machen, muß man das Potential V verringern, indem man den Punkt B der Brücke (vgl. Fig. 1, p. 908) mit der Erde verbindet. Wenn die Widerstände w_3 und w_4 genügend klein im Vergleiche zu den scheinbaren Widerständen der Brückenseiten AD und AF gewählt werden, ist dann auch das Potential in D und F , also V , sehr wenig von Null verschieden, und die besprochenen Fehler sind vernachlässigbar klein. Auf diese Weise konnte vollständige Gleichheit der Brückeneinstellung beim Vertauschen der Seiten AD und AF erzielt werden.

2. *Stromübergänge zwischen Teilen der Brücke und zwischen Brücke und Erde.* — Die eben besprochene Maßregel brachte andererseits die Notwendigkeit mit sich, alle übrigen Teile der Brücke sorgfältig von der Erde (Fußboden, Zimmerwänden etc.) zu isolieren, was durch ausgiebige Verwendung von Paraffin gelang. Das gleiche Mittel wurde auch mit gutem Erfolge dazu benutzt, direkte Stromübergänge zwischen den einzelnen Teilen der Brücke zu vermeiden.

3. *Ladungsströme zwischen Teilen der Brücke und zwischen Brücke und Erde.* — Neben den so vermiedenen Nebenschlüssen in Form von Leitungsströmen gab es jedoch noch andere Störungen, die von den Ladungsströmen herrührten, welche einerseits zwischen den einzelnen Bestandteilen der Brücke, vornehmlich den Kondensatoren, andererseits aber zwischen den Kondensatoren und der Erde flossen. Die ersteren konnten dadurch, daß bei der Aufstellung der Apparate, sowie bei der Führung der Leitungen auf sie Rücksicht genommen wurde, leicht unschädlich gemacht werden, nicht immer aber die letzteren. Es könnte scheinen, als ob durch diese Kapazitätswirkungen zwischen Brücke und Erde eine Abhängigkeit der Brückeneinstellung von der Spannung verursacht würde, wodurch natürlich die Verwirklichung des Zieles der Messungen, die Prüfung des Quadratgesetzes zwischen Verlust im Dielektrikum und Spannung, unmöglich gemacht wäre. Führt man, um diese Frage zu untersuchen, die Kapazität C_1 bez. C_2 , welche

die Niederspannungsbelegung von c_1 bez. c_2 gegen Erde besitzt, in die Rechnung ein, so erhält man statt der Gleichungen (1a) und (1b) die Stromlosigkeitsbedingungen

$$(3a) \quad n^2 c_1 (c_2 + C_2) w_1 w_2 = 1 - n^2 (c_1 C_2 - c_2 C_1) w_1 w_4$$

und

$$(3b) \quad (c_2 + C_2) w_2 w_3 = (c_2 w_4 - c_1 w_3) w_1 - C_2 w_3 w_4.$$

Daraus ergibt sich 1.), daß die Brückeneinstellung von der Spannung unabhängig bleibt, 2.), daß die Brückeneinstellung sowohl von C_1 als auch von C_2 beeinflusst wird, daß aber vor allem C_2 möglichst klein gehalten werden muß. Dies ist leicht zu erreichen, solange die Messungen bei verhältnismäßig niedrigen Spannungen (bis etwa 1500 Volt) vorgenommen werden, bietet jedoch Schwierigkeiten, sobald man zur Verwendung höherer Spannungen übergeht. Wie später gezeigt werden wird, ist man nämlich bei hohen Spannungen zur Anwendung von Vergleichskondensatoren sehr kleiner Kapazität aber großer Oberfläche gezwungen, die also eine verhältnismäßig große Kapazität gegenüber Erde besitzen. Durch diese Fehlerquelle ist somit eine Grenze der Verwendbarkeit der Methode für quantitative Messungen, zumal bei hohen Spannungen, gegeben.

4. *Kapazität der Widerstände.* — Von den Widerständen w_2 ,

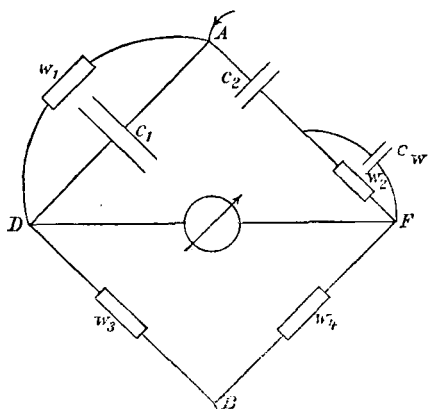


Fig. 1a.

w_3 und w_4 ist vorausgesetzt worden, daß sie weder Kapazität noch Selbstinduktion besitzen. Wenn es nun auch gelingen mag, die Selbstinduktion der als Widerstände dienenden Apparate auf ein unschädliches Maß herabzubringen, so ist dies jedoch viel weniger leicht für die Kapazität, die hier besonders in Betracht kommt, zumal bei größeren Widerständen, ausführbar. Es möge

zunächst untersucht werden, welche Veränderung die Stromlosigkeitsbedingungen erfahren, wenn die Voraussetzung der

Kapazitätslosigkeit nur bei dem Widerstande w_2 nicht erfüllt ist. Die Kapazität von w_2 sei c_w (vgl. Fig. 1a); dann wird der Widerstandsoperator des Zweiges AF

$$a_2 = \frac{w_2}{1 + i n c_w w_2} + \frac{1}{i n c_2},$$

während die der übrigen drei Seiten unverändert bleiben

$$a_1 = \frac{w_1}{1 + i n c_1 w_1}, \quad a_3 = w_3, \quad a_4 = w_4.$$

Als Bedingungen für die Stromlosigkeit des Brückenzeiges findet man jetzt

$$(4a) \quad n^2 c_1 c_2 w_1 w_2 = 1 + n^2 c_w w_1 w_2 \left(c_2 \frac{w_4}{w_3} - c_1 \right)$$

und

$$(4b) \quad \frac{c_1}{c_2} = \frac{w_4}{w_3} - \frac{w_2}{w_1} \left(1 + \frac{c_w}{c_2} \right).$$

Gleichung (4b) zeigt, daß es zur Bekämpfung des Einflusses dieser Fehlerquelle wesentlich ist, das Verhältnis c_w/c_2 möglichst klein zu halten.

Widerstände.

Für w_2 zeigten sich, wie zu erwarten war, gewöhnliche bifilar gewickelte Widerstände infolge ihrer Kapazität gänzlich unverwendbar. Ich griff daher zuerst zu dem Mittel, zu dem man gewöhnlich seine Zuflucht nimmt, wenn man reiner Widerstände bedarf, zu Glühlampen. Es zeigte sich jedoch, daß diese auch schon bei den sehr geringen hier in Betracht kommenden Stromstärken (2—3 Milliamp. wurden nie überschritten) eine so große Änderung des Widerstandes mit der Stromstärke aufwiesen, daß sie für meine Zwecke nicht benutzt werden konnten. Wenigstens gilt dies für Lampen mit größeren Widerständen (von etwa 1000 Ohm aufwärts), bei denen diese Erscheinung natürlich am stärksten auftritt; Lampen kleineren Widerstandes waren ganz gut verwendbar. Dieselbe Eigenschaft der Änderung des Widerstandes mit der Stromstärke zeigte sich auch bei Graphitwiderständen und schloß ihre Benutzung völlig aus.

Dagegen bewährte sich eine Art von Widerständen sehr gut, bei der sehr dünner Manganindraht auf etwa 1 mm dicke Glimmerplatten in nur einer Lage aufgewickelt war. Solche Widerstände standen mir in Beträgen von 10000—100000 Ohm

zur Verfügung. Eine Reihe von Widerständen von 1000 bis 5000 Ohm stellte ich mir selbst aus 0,05 mm starkem Manganindraht her. Sie wurden nach Chaperon mit abwechselndem Wickelungssinn der einzelnen Lagen auf einen Holzkern gewickelt. Für noch kleinere Widerstände (von 50—500 Ohm), deren ich bei größeren Kapazitäten der untersuchten Kondensatoren bedurfte, benutzte ich Glühlampen. Alle diese Widerstände wurden wiederholt sorgfältig auf ihre Konstanz bei veränderlicher Stromstärke geprüft und zeigten sich vollkommen verlässlich.

Um diese Widerstände bequem in die Brücke ein- und aus derselben ausschalten zu können, bediente ich mich folgender Anordnung: In einer rechteckigen Paraffinplatte wurde, etwa 2 cm von den Rändern entfernt, eine Anzahl gläserner Quecksilbernäpfe von etwa 6 mm Durchmesser und 1 cm Tiefe in beiläufig 5 cm Entfernung voneinander angebracht. An den beiden Enden jedes der Widerstände wurde je ein Zuführungsdraht angebracht, der an seinem freien Ende einen Haken aus 2 mm dickem Kupferdraht trug, mit dem er in einen Quecksilbernapf tauchte. Die Schaltungen an dem so hergestellten Rheostaten nahm ich mit Hilfe Γ -förmiger Bügel aus 1 mm starkem Kupferdraht vor, von denen jeder zwei benachbarte Näpfe miteinander verband und durch deren Herausnehmen und Einsetzen die einzelnen Widerstände nach Belieben eingeschaltet und kurzgeschlossen werden konnten. Auf derselben Paraffinplatte brachte ich noch eine Wippe an, die zur Vornahme der früher erwähnten Vertauschung der Zweige AD und AF erforderlich war.

Später benutzte ich auch noch einen Stöpselrheostat von O. Wolff, Berlin, mit Widerständen von 0,1—50 000 Ohm, die nach Chaperonscher Art gewickelt waren und sehr geringe Kapazität besaßen.

Die Kapazität aller dieser in w_2 verwendeten Widerstände war an sich wohl klein, doch machte sie sich bei kleineren Kapazitäten der Kondensatoren c_1 und c_2 schon bemerkbar. Es gibt heute, soviel ich weiß, überhaupt noch keine Vorrichtungen, die als wirklich „reine“ und konstante Widerstände größeren Betrages dienen könnten. Dies gilt schon für Widerstände von etwa 10 000 Ohm aufwärts. Es handelt sich, wie

erwähnt, hauptsächlich darum, Widerstände von großem Betrage und dabei kleiner Oberfläche herzustellen, die genügend starke Ströme vertragen, ohne ihren Wert zu ändern, und da solche Widerstände ja für viele Zwecke gebraucht werden, glaube ich, daß hier von einem wirklichen Bedürfnis die Rede sein kann.

Durch die Kapazität der Widerstände ist also der Anwendung der Methode wiederum eine Grenze bezüglich der Größe der Kapazitäten c_1 und c_2 gesetzt, unterhalb deren quantitativ richtige Messungen nicht mehr ausgeführt werden können. Es wird sogleich noch näher besprochen werden, daß die Methode für kleinere Kapazitäten als ca. 0,001 Mikrof. (bei meiner Anordnung) nicht mehr sicher arbeitet.

Was nun die Widerstände w_3 und w_4 anbetrifft, so besitzt man ein Mittel, die Brückeneinstellung von dem Einfluß ihrer Kapazität von vornherein zu befreien. Dieses besteht darin, daß man w_3 und w_4 in jeder Hinsicht einander völlig gleich macht. Da auf jeder Seite der Bedingungsgleichung für die Stromlosigkeit des Brückenzweiges eine dieser beiden Größen als Faktor auftritt, fallen sie dann mit ihrer Kapazität und Selbstinduktion ganz aus der Rechnung. Von diesem Mittel ist bei den meisten Messungen Gebrauch gemacht worden. Schließlich wurde doch bei einigen Versuchen, wo es besonders wünschenswert war, von der Erfüllung dieser Bedingung ($w_3 = w_4$) abgesehen. Die Möglichkeit hierzu gewährte der genannte Wolffsche Widerstandskasten, bei dem die Abstufungen von 0,1—2000 Ohm, die ich daraufhin genau untersuchte, selbst in meiner gerade dafür sehr empfindlichen Anordnung keinen merklichen Einfluß von Kapazität erkennen ließen.

5. *Verlust der Vergleichskondensatoren.* — Eine weitere Voraussetzung, die den Gleichungen (1a) und (1b) zugrunde gelegt worden ist, betraf den Kondensator c_2 , von dem angenommen war, daß er selbst keinerlei Verlust besitze. Wenn wir diese Voraussetzung jetzt fallen lassen, dagegen von der soeben behandelten Fehlerquelle zunächst absehen, die von der Kapazität des Widerstandes w_2 herrührt, erhalten wir die Stromlosigkeitsbedingungen

$$(5a) \quad \pi^2 c_1 c_2 w_1 w_2 = 1 + \frac{1}{w_2'} \left(w_2 - w_1 \frac{w_4}{w_3} \right)$$

und

$$(5b) \quad \frac{c_1}{c_2} \left(1 + \frac{w_2}{w'_2} \right) = \frac{w_4}{w_3} - \frac{w_2}{w_1},$$

worin (vgl. Fig. 1b), ganz ebenso wie dies für den untersuchten Kondensator dargestellt wurde, w'_2 einen zu einem verlustlos

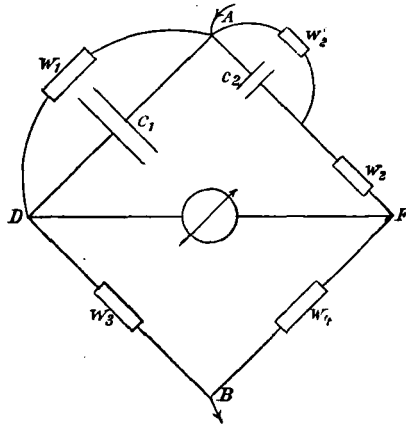


Fig. 1 b.

angenommenen Kondensator von der Kapazität c_2 parallel geschalteten Widerstand bedeutet.

Vergleichskondensatoren für höhere Spannungen.

Von allen bisher erörterten Fehlerquellen war die zuletzt erwähnte diejenige, deren Beseitigung die größten Schwierigkeiten machte. Es erwies sich nämlich, daß die Herstellung wirklich verlustfreier Kondensatoren, ja selbst solcher mit vernachlässigbar kleinem Verlust eine zumal dann nichts weniger als leichte Aufgabe ist, wenn es sich um höhere Spannungen handelt. Die Hauptursache hierfür sind die bei hohen Spannungen nur schwer zu vermeidenden Spitzenentladungen¹⁾ an den Belegungen und der durch sie bewirkte Energieverlust. Verschiedene fertige Luftkondensatoren, die mir zur Verfügung

1) Unter Spitzenentladungen sollen hierbei nicht nur die an den Belegungsändern von Leidener Flaschen auftretenden Erscheinungen, sondern allgemein die Entladungsvorgänge verstanden werden, die an Stellen stattfinden, an denen die Intensität des elektrischen Feldes bestimmte Grenzen überschreitet.

standen, waren bei nur einigermaßen höheren Spannungen überhaupt nicht verwendbar, und ich ging deshalb daran, mir einen Luftkondensator selbst herzustellen. Derselbe bestand aus 38 Zinkblechplatten, die in einen Zinkblechkasten von 30 cm Länge, 14 cm Breite und 25 cm Höhe eingesetzt waren. Sie wurden mit Hilfe kleiner Bleiglasstückchen in etwa 3 mm Abstand voneinander gehalten und ruhten auf zwei Bleiglasstäben. Jede zweite Platte wurde mit dem Blechkasten leitend verbunden, die übrigen untereinander. Die Anordnung in der Brücke wurde immer so gemacht, daß der Blechkasten und die mit ihm verbundene Plattenschar auf niedrigem Potential waren. Dieser Kondensator erwies sich, nachdem an sämtlichen Platten alle Ecken sorgfältig nach einem Krümmungsradius von etwa 1,5 cm abgerundet worden waren, als gut brauchbar bei niedrigen Spannungen bis etwa 900—1000 Volt. Sein Verlust war sehr gering, und er wurde auch bei einzelnen Messungen später benutzt. Seine Kapazität, die im ganzen nicht ganz 0,01 Mikrof. betrug, konnte natürlich durch Ausschalten einer beliebigen Anzahl Platten leicht verändert werden. Sowie man aber die Spannung über den angegebenen Wert hinaus steigerte, zeigte er einen Verlust infolge von Spitzenwirkung, der viel schneller als mit dem Quadrate der Spannung wuchs. Dieser Verlust ist bei den Messungen immer daran leicht zu erkennen, daß eine gewisse Unstetigkeit, ein fortwährendes Sichändern der Brückeneinstellung eintritt, und schon dadurch läßt sich seine etwaige Anwesenheit immer mit Bestimmtheit nachweisen. Nicht viel besser erwies sich in dieser Hinsicht ein zweiter Kondensator, den ich nach demselben Prinzip, aber mit 1 cm Plattenabstand herstellte.

Ich suchte dann durch Anwendung von Ölen als Dielektrikum zum Ziele zu kommen. Auch dies mißlang. Rizinusöl, mit dem ich zuerst Versuche anstellte, zeigte selbst nicht unerheblichen Verlust, Paraffinöl, bei dem der Verlust vernachlässigbar klein war, erwies sich infolge seiner sehr geringen Durchschlagsfestigkeit als für höhere Spannungen un verwendbar, und ich erkannte bald, daß, wenn das Ziel, einen Kondensator mit vernachlässigbar kleinem Verlust für höhere Spannungen herzustellen, überhaupt erreicht werden konnte, dies nur durch die Verwendung von Luft als Dielektrikum möglich war.

Tatsächlich gelang auch schließlich die Konstruktion eines Luftkondensators, der auch bei hohen Spannungen (bis etwa 10000 Volt Effektivwert) seinen Zweck in vollkommen befriedigender Weise erfüllte. Dieser Kondensator, der in Fig. 2a dargestellt ist, bestand aus zwei Messingrohren von 1 mm

Wandstärke, 1 m bez. 95 cm Länge und 110 mm bez. 85 mm äußerem Durchmesser. Das eine Ende des äußeren Rohres wurde, nachdem es durch einen halbkugelförmigen Boden verschlossen worden war, mit einem zylindrischen Paraffinblock von 20 cm Höhe und 13 cm Durchmesser umgossen. Das innere Rohr wurde an beiden Enden durch Halbkugeln abgeschlossen und erhielt an einem Ende einen 1 cm starken Messingstab von 24 cm Länge angelötet, der an seinem freien Ende ein Gewinde trug und zur Befestigung des Rohres diente. Die Art seiner

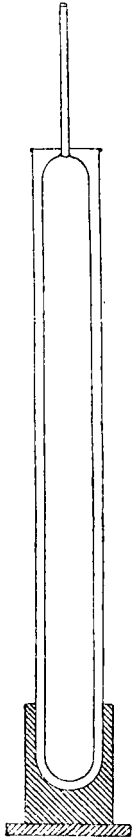


Fig. 2 a.

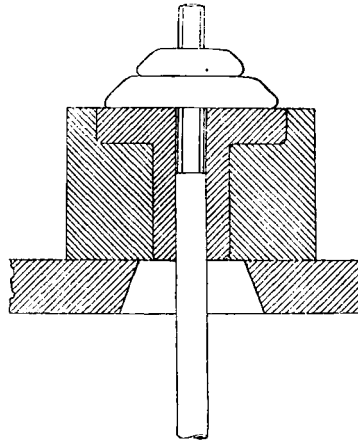


Fig. 2 b.

Aufhängung ist durch Fig. 2b dargestellt. Auf das Gewinde waren zwei Muttern aufgebracht, von denen die obere zum Festschrauben der Zuleitung bestimmt war, während die untere und mit ihr der ganze aufzuhängende Kondensator-
teil auf einer Holzbüchse ruhte, die ihrerseits mit einem

Paraffinklotz von 5 cm Höhe umgossen war. Dieser wurde von einem durchbohrten Holzbrett getragen, das durch Holzklammern an der Tischplatte eines hölzernen Stativs befestigt war. Irgendwelche Kanten wurden an dem ganzen Apparat sorgfältig vermieden, wie dies z. B. an den Muttern in Fig. 2b ersichtlich ist. Die Kapazität dieses Luftkondensators, die maximal 0,00023 Mikrof. betrug, konnte dadurch in stetiger Weise verändert werden, daß die Tischplatte des Stativs mittels Zahnstange, Schraubenrad, Schraube und Handrad bequem gehoben und gesenkt werden konnte.

Ich vermochte an diesem Kondensator auch bei hohen Spannungen keinerlei Leuchten im Dunkeln oder Geräusch wahrzunehmen, durch welche Begleiterscheinungen sich die Spitzenentladungen in anderen Fällen sofort bemerkbar gemacht hatten. Ebenso wenig konnte ich an ihm irgendeinen Verlust feststellen, trotzdem ich ihn wiederholt in verschiedener Weise daraufhin untersuchte. Er ist bei den endgültigen Spannungsversuchen, wie ich die Messungen zur Ermittlung der Abhängigkeit des Verlustes von der Feldintensität kurz nennen will, ausschließlich als Kondensator c_2 benutzt worden.

Außerdem stand mir noch ein von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie bezogener Luftkondensator zur Verfügung, der aus zwei gegeneinander verdrehbaren Systemen gleich großer konzentrischer, halbkreisförmiger Platten bestand. Der Verlust dieses sehr bequem veränderbaren Kondensators, dessen maximale Kapazität $2,99 \cdot 10^{-3}$ Mikrof. betrug, war, wie ich wiederholt feststellte, vernachlässigbar klein; das Komplement des Phasenverschiebungswinkels zwischen Spannung und Stromstärke betrug bei ihm weniger als eine Minute. Auch er ist bei den endgültigen Messungen, soweit sie bei Spannungen bis zu höchstens 1500 Volt vorgenommen wurden, als Vergleichskondensator c_2 benutzt worden. Überdies diente er mir als Normalkondensator für die Kapazitätsbestimmung, zu welchem Zwecke ich ihn durch Vergleich mit einer Selbstinduktions-Normalrolle eichte.

Die mehrfach erwähnte Untersuchung der Luftkondensatoren auf Verlust hatte zur Voraussetzung, daß die Luft bei niedrigen Spannungen keine merkliche Leitfähigkeit besitzt, also der Verlust bei den Luftkondensatoren nur durch Ober-

flächenleitung zustande kommt. Demnach mußte bei diesen eine Änderung der Stellung des beweglichen Teiles den Verlust unverändert lassen. Die Richtigkeit dieser Annahme wurde vielfach in der Weise geprüft, daß die Luftkondensatoren bei ihrer Untersuchung auf Verlust in den verschiedensten Kombinationen untereinander und mit anderen Kondensatoren in der Brücke verglichen wurden. Z. B. wurde der Hochspannungsluftkondensator bei Spannungen bis 1500 Volt u. a. auch so geprüft, daß er mit dem zuletzt besprochenen Kondensator der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie zusammen die Kapazität c_2 darstellte (im Zweige AD befand sich ein Kondensator mit Verlust). Nachdem die Brückeneinstellung gemacht worden war, wurde er herausgenommen und die Brücke neuerlich eingestellt, wozu der andere variable Luftkondensator natürlich etwas verstellt werden mußte. Da jedoch an allen übrigen Größen der Brücke nicht die geringste Änderung vorzunehmen war, wurde daraus geschlossen, daß der untersuchte Luftkondensator keinen, innerhalb der Grenzen des Beobachtbaren liegenden Verlust besitze. Der Verlust durch Spitzenentladungen, der bei hohen Spannungen an anderen Kondensatoren auftrat und in der erwähnten Weise zu erkennen war, zeigte sich hier bis zu jenen Spannungen, bei denen zwischen den Belegungen Funken überzuspringen begannen, überhaupt nicht.

6. Die *Spitzenentladungen*, von denen vorhin die Rede war, bilden auch an den *zu untersuchenden Kondensatoren* eine nur durch ganz besondere Vorkehrungen zu beseitigende oder wenigstens unschädlich zu machende Fehlerquelle. Sie bedeuten einen Energieverlust, der mit dem im Dielektrikum stattfindenden gar nichts zu tun hat, und trüben daher den Einblick in die Vorgänge, die sich im Dielektrikum selbst abspielen. Der Energieverlust durch die Spitzenentladungen wächst wesentlich schneller als mit dem Quadrate der Spannung und übersteigt, wenn man die Spannung steigert, den Verlust im Dielektrikum um ein Vielfaches. Dieser kommt neben ihm bald gar nicht mehr in Betracht, und wenn man nicht für die Beseitigung oder wenigstens Eindämmung dieses Ausstrahlungsverlustes sorgt, ist es daher für Hochspannungskondensatoren fast ganz gleichgültig, ob man als Dielektrikum ein Material

mit großem oder kleinem dielektrischen Verlust wählt. Ich glaube auf diese Tatsache besonders hinweisen zu sollen, weil man auf sie beim Bau von Kondensatoren bis jetzt eigentlich so gut wie keine Rücksicht genommen hat.

Da die Beseitigung des Ausstrahlungsverlustes eine Vorbedingung für die genaue Bestimmung des dielektrischen Verlustes nach der hier benutzten Methode ist, konnte an die eigentlichen Messungen erst gegangen werden, nachdem es gelungen war, eine Belegungsart zu finden, die dieser Anforderung entsprach. Die auch bei Hochspannungskondensatoren noch immer üblichen Stanniolbelegungen erwiesen sich, wie zu erwarten war, als völlig unbrauchbar. Das Gleiche gilt natürlich, womöglich in noch höherem Maße, für Silberbelegungen, wie sie auf chemischem Wege, z. B. nach dem Böttgerschen Verfahren hergestellt werden. Ein klein wenig besser, aber immer noch ganz unbefriedigend erwiesen sich Belegungen, die aus kreisrunden Messingplatten von 15 cm Durchmesser und 4 mm Dicke mit sorgfältig abgerundeten Kanten gebildet waren. Umgießen der Ränder dieser Platten mit Paraffin brachte eine weitere, jedoch nur ganz unwesentliche Besserung. Von etwa 3000 Volt an wuchs auch hier w_2 noch rapid, während gleichzeitig das bekannte, durch die Spitzenentladungen hervorgerufene Knistern und Zischen bemerkbar wurde und im Dunkeln ein bläuliches Leuchten des ganzen Randes beobachtet werden konnte. Einen wesentlichen Fortschritt brachte erst die Anwendung von Quecksilber als Belegung. Jedoch zeigen sich auch hier, wenn die Spannung höher als etwa 5000 Volt wird (es ist dies etwas verschieden, je nach der Dicke des Dielektrikums), Spitzenentladungen mit ihren Begleiterscheinungen, dem Knistern und Leuchten.

Ich versuchte nun die Anwendung von Öl, das schon bei den Stanniol- und Silberbelegungen, wenn diese damit bedeckt wurden, eine gewisse mildernde Wirkung auf den Ausstrahlungsverlust gezeigt hatte. Dies brachte endlich einen Erfolg; die mit Öl überschichteten Quecksilberbelegungen erwiesen sich als ein ausreichendes, aber auch als das einzige Mittel zur Unschädlichmachung der Spitzenentladungen bis zu einer genügend hohen Grenze der elektrischen Feldintensität. Es ist

deshalb von dieser Belegungsart bei den Messungen vielfach Gebrauch gemacht worden.

Dies bezieht sich alles auf Spitzenentladungen, die an den Enden der Belegungen in Luft oder an der Grenzschicht Luft-Dielektrikum Platz greifen. Aber auch bei *Belegungen, die ganz in ein Dielektrikum eingebettet sind*, findet bei stärkerer Beanspruchung in dem Dielektrikum selbst eine ähnliche Spitzen- oder Glimmentladung statt. Dieselbe setzt bei den meisten Dielektrizis bei einer gar nicht allzu hohen Spannung plötzlich ein und macht die Verwendung dieser Dielektrika bei höherer Beanspruchung unmöglich. Beispiele dafür werden unten besprochen werden.

Das bisher über die Fehlerquellen Gesagte kann folgendermaßen zusammengefaßt werden. Die in Betracht kommenden Fehlerquellen waren:

1. Ladungserscheinungen im Brückenzeige.
2. Nebenschlüsse in der Brücke und zwischen Brücke und Erde.
3. Kapazitätswirkungen in der Brücke und zwischen Brücke und Erde.
4. Kapazität der Widerstände.
5. Verlust des Vergleichskondensators.
6. Ausstrahlungsverluste am untersuchten Kondensator.

Die Fehlerquellen 1, 2, 5 und 6 konnten auf ein unschädliches Maß gebracht werden, 3, 4 (auch 2) werden von der Spannung nicht beeinflußt. Die Fehlerquelle 4 kann bei kleinen Werten von c_1 und c_2 und größerem Verlust, also wenn w_2 groß wird, nicht ganz vermieden werden. Die Kapazitätswirkung der Kondensatoren gegenüber Erde (3) kann bei hohen Spannungen nicht vernachlässigbar klein gemacht werden, weil man dadurch an die Anwendung großer Oberflächen der Vergleichskondensatoren gebunden ist, daß man a) als Dielektrikum für dieselben nur Luft verwenden kann, b) unter eine bestimmte Dicke des Dielektrikums, etwa 1 cm, nicht herabgehen darf und c) zur Vermeidung von Spitzenentladungen möglichst einfache Formen verwenden, daher auch die Ineinanderschachtelung mehrerer Belegungen vermeiden muß.

Man kann demnach bei hohen Spannungen die Messung von dem Einfluß der Fehlerquellen nicht ganz befreien, doch

beeinträchtigt dies nicht die einwandfreie Anwendbarkeit der Methode zur Untersuchung des Quadratgesetzes. Sollen die Messungen quantitativ richtige Resultate ergeben, so muß natürlich die Wirkung aller Fehlerquellen vernachlässigbar klein gemacht werden. Dies ist nur dadurch möglich, daß man die Kapazitäten c_1 und c_2 eine gewisse Grenze nicht unterschreiten läßt, die sich bei meiner Anordnung, wie erwähnt, mit etwa 0,001 Mikrof. ergeben hat.

Es erübrigt die Beschreibung der bei den Untersuchungen *sonst noch verwendeten Apparate*:

Als Brückeninstrument diente, wie erwähnt, ein optisches Telephon. Seine Einstimmung erfolgte zunächst auf 86 Schwingungen in der Sekunde, später wurde es auf 50 Schwingungen in der Sekunde herabgestimmt. Von den beiden Eigentönen, die das Instrument bei jeder Einstimmung besitzt, war der Benutzte immer der Tieferer. Die Messung der Schwingungszahl wurde mittels des phonischen Rades vorgenommen.

Im Hauptzweige befand sich ein Induktorium für 30 cm Schlagweite von H. Boas, Berlin, das nach unbefriedigend verlaufenen Versuchen mit mehreren anderen kleineren Induktorien in Verwendung genommen wurde. Die effektive Spannung an den Sekundärklemmen des Induktoriums wurde durch ein Braunsch'sches Elektrometer gemessen, dessen Meßbereich 10000 Volt betrug.

Die Primärwicklung des Induktoriums wurde bei dem größeren Teile der Messungen mit intermittierendem Strom gespeist, der dadurch erhalten wurde, daß der der Akkumulatornbatterie des Institutes gewöhnlich bei 20 Volt entnommene Gleichstrom durch eine elektromagnetisch getriebene Saite unterbrochen wurde. Die schwingende Saite äußerte, solange sie sich im selben Zimmer wie das optische Telephon befand, direkte akustische Einwirkungen auf dieses Instrument, weshalb ich sie in einem anderen Raume aufstellte.

Bei einem Teile der Messungen wurde zum Betrieb des Induktoriums Maschinenwechselstrom benutzt, der einem Drehstromgenerator der Siemens-Schuckert-Werke für 550 Volt, 3.3,5 Amp. und 50 Perioden entnommen war. Dieser war im Maschinenraum des Institutes aufgestellt und wurde von einem Gleichstrommotor angetrieben. Durch Verändern der Feld-

erregung dieses Motors konnte die Schwingungszahl des Wechselstromes ausreichend genau eingestellt werden.

Mithin wurde die Methode der in der Technik üblichen Art des Wechselstromes nach Schwingungszahl, Spannung und Form angepaßt, was ohne Schwierigkeit gelang.

B. Untersuchungen.

Ein Teil der im folgenden mitgeteilten Messungen und Beobachtungen wurde an verschiedenen Dielektrisis ausgeführt, aus denen ich die zur Untersuchung erforderlichen Kondensatoren selbst herstellte; einige von ihnen standen mir auch schon in verarbeitetem Zustande in Form von Kondensatoren oder Kondensatorplatten zur Verfügung. Außerdem hatte ich noch Gelegenheit, eine Anzahl von Kraftübertragungskabeln für Betriebsspannungen von 700—20000 Volt zu untersuchen.

I. Vergleichende Messungen mit Spannungen verschiedener Kurvenform.

Es soll nun zunächst eine Gruppe von Messungen besprochen werden, die ich mit Spannungen sehr verschiedener Kurvenform, aber unter sonst gleichen Umständen vornahm. Die Anordnung dieser Versuche ist durch Fig. 3 dargestellt.

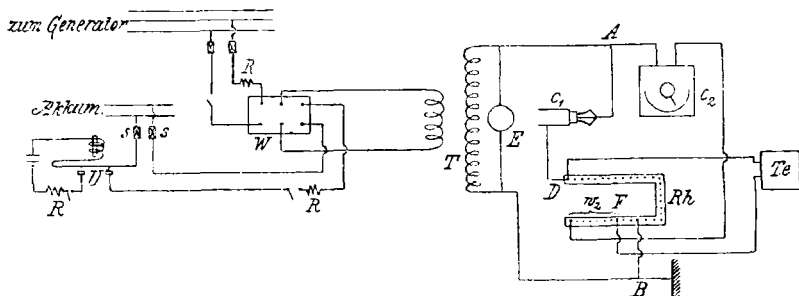


Fig. 3.

Die Primärwicklung des Induktoriums T konnte durch bloßes Umlegen der Wippe W entweder in den Stromkreis des Unterbrechers oder in den der Maschine gebracht werden. U stellt den Unterbrecher mit seinen beiden Quecksilbernäpfen dar. Zum Antrieb der Saite diente ein besonderer Stromkreis, der links gezeichnet ist. s sind Sicherungen, R Regulierwider-

stände. Im Sekundärkreis des Induktoriums bedeuten c_1 und c_2 wie bisher die beiden Kondensatoren in der Brücke. Als zu untersuchender Kondensator c_1 ist hier ein Kabel gezeichnet, als Kondensator c_2 diente bei diesen Messungen der verstellbare Kondensator der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie. Rh ist der Stöpselrheostat von O. Wolff, der die Widerstände w_2 , w_3 und w_4 lieferte. E ist das Braunsche Elektrometer, Te das optische Telephon. Nachdem die Saite durch Verändern ihrer Spannung und die Maschine durch Verändern der Felderregung ihres Motors auf den Ton des optischen Telephons eingestimmt waren, wurde die Brücke zunächst mit dem Unterbrecherstrom¹⁾ eingestellt, die Empfindlichkeit der Einstellung ermittelt, hierauf die Wippe umgelegt, das Bild beobachtet und die Empfindlichkeit abermals bestimmt. Es genügt wohl, wenn ich ein Beispiel für diese Messungen anführe, die alle dasselbe Ergebnis hatten.

Kabel X (vgl. Tab. 7), alle drei Leiter wurden mit dem Punkte A , der Mantel mit dem Punkte D der Brücke verbunden.

$$\frac{n}{2\pi} = 50,1.$$

	E	c_2	w_4	w_3	Δw_3	w_2	Δw_2
Unterbrecher- strom	1400	$1,519 \cdot 10^{-3}$ M.F.	500	137,7	$< 0,1 \Omega$	31300	≈ 300
Maschinenstrom	1400	„	500	137,7	$< 0,1 \Omega$	31300	300

Zur Brückeneinstellung dienten w_2 und w_3 . Δw_2 und Δw_3 bedeuten die kleinste wahrnehmbare Änderung von w_2 und w_3 . Die Spannung, die hier und auch bei den im folgenden wiedergegebenen Messungen angegeben ist, ist die am Elektrometer abgelesene (Effektivwert), streng genommen also nicht die an c_1 herrschende. In Wirklichkeit ist jedoch der Spannungsabfall in w_3 vollständig vernachlässigbar.

Bei allen diesen vergleichenden Messungen blieb das Bild vollständig scharf. Obgleich also die Kurvenform der beiden Wechselspannungen in Anbetracht ihrer gänzlich verschiedenen Entstehungsweise bestimmt sehr verschieden war, zeigte sich

1) So will ich der Kürze halber den Wechselstrom nennen, der erhalten wurde, wenn die Primärwicklung des Induktoriums in der angegebenen Weise mit intermittierendem Strom beschickt wurde.

1. Als erstes Beispiel eines Spannungsversuches diene das folgende: Ein 40 cm langes Rohr aus Flintglas von 5 cm äußerem Durchmesser und 4—5 mm Wandstärke wurde an einem Ende zugeschmolzen, 8 cm hoch mit Quecksilber gefüllt und ebenso tief in Quecksilber eingetaucht. Auf jede dieser Quecksilberbelegungen wurde eine etwa 5 mm hohe Schicht von Paraffinöl gegossen. In die Quecksilberbelegungen tauchten die Zuleitungen und zwar so, daß sie das Glasrohr selbst nicht berührten. Dieser Kondensator wurde als c_1 in die Brücke gebracht. Die Resultate einer der an diesem Flintglasrohr angestellten Messungsreihen sind in Tab. 2 wiedergegeben.

Tabelle 2.

E	w_2	Δw_2
2000	51000	2500
3000	50000	2500
4000	51000	< 2500
5000	51000	< 2500
6000	51000	
7200	51000	1200
8000	51000	

c_2 blieb bei dieser Messungsreihe völlig konstant. Das selbe gilt, wie die Tabelle zeigt, innerhalb der Grenzen der Einstellungsfehler auch für w_2 . Würde hier der Verlust z. B. proportional der 2,1^{ten} Potenz der Spannung wachsen, so dürfte w_2 , um bei 8000 Volt den Wert 51000 Ohm zu erreichen, bei 2000 Volt nur 44400 Ohm betragen, wie sich leicht berechnen läßt.

2. Diesem Beispiele soll nun ein anderes gegenübergestellt werden. Wie nach den bisher in der Literatur vorliegenden Versuchsergebnissen zu erwarten war, erhält man nämlich nicht in allen Fällen eine so völlige Unveränderlichkeit von w_2 beim Ändern der Spannung am untersuchten Kondensator. *Wohl die meisten Messungen, die ich an anderen Kondensatoren vornahm, ergaben für höhere Spannungen unzweifelhaft größere Werte von w_2 als für niedrigere.* Um diese Tatsache genauer untersuchen und feststellen zu können, ob die sehr naheliegende Vermutung, daß diese Zunahme von w_2 von der *Erwärmung*

des Dielektrikums herrühre, auf Wahrheit beruhe, stellte ich einen Kondensator her, der die erwähnte Erscheinung besonders stark zeigen mußte. Für seine Herstellung waren folgende Gesichtspunkte maßgebend: Das zu verwendende Dielektrikum sollte einen nicht allzu kleinen Verlust aufweisen; seine Dicke mußte möglichst gering sein; sie mußte dagegen an den Rändern der Belegungen möglichst groß gemacht werden, damit genügend hohe Spannungen erreicht werden konnten. (Natürlicherweise ist der in bezug auf das Durchschlagen gefährdetste Teil des Dielektrikums derjenige, der sich unter den Rändern der Belegungen befindet, an denen ja die elektrische Flächendichte ein Maximum besitzt; mehrere dünnwandige Reagensgläser, die ich untersuchte, wurden auch regelmäßig am Rande der Belegungen durchschlagen. Außerdem aber lassen sich auch bei Verwendung der mit Öl überschichteten Quecksilberbelegungen die Spitzenentladungen bei höheren Spannungen nicht mehr ganz unterdrücken, wenn die Dicke des Dielektrikums unter den Rändern allzu klein ist.)

Ein Kondensator, der alle diese Voraussetzungen erfüllte, war der folgendermaßen hergestellte: An einem Kapillarrohr (Thermometerrohr) blies ich ein Ende in eine sehr dünnwandige Kugel von 17,3 mm äußerem Durchmesser aus. Diese Kugel wurde mit Quecksilber soweit gefüllt, daß dasselbe bis in das Kapillarrohr (etwa 4 mm weit) hineinreichte. Ebenso tief wurde die Kugel in Quecksilber eingesenkt und die Zuleitung zur inneren Belegung durch einen in das Rohr eingeführten, die zur äußeren durch einen in das außen befindliche Quecksilber getauchten Draht bewerkstelligt. Beide Belegungen wurden auch hier mit Paraffinöl überschichtet. Es war so ein Kondensator gewonnen, der sich der Idealform eines Hochspannungskondensators, der des Kugelkondensators, soweit als irgend möglich, näherte. Die Länge der Belegungsänder und damit die Gefahr der Spitzenentladungen war auf das geringste mögliche Maß gebracht, und die vorhin aufgestellte Forderung der Verstärkung des Dielektrikums unter den Rändern der Belegungen war auch erfüllt.

Tab. 3 bezieht sich auf eine an diesem Kondensator durchgeführte Messungsreihe.

Tabelle 3.

E	w_2
1000	165 000
2000	167 000
3000	171 000
4000	177 000
5100	195 000

Bei allen Messungen an diesem Kondensator war deutlich folgende Beobachtung zu machen: Wenn die Spannung plötzlich geändert wurde, befand sich das Bild immer einige Minuten hindurch in einem Zustande der Veränderung, und zwar dauerte dieser länger, wenn die Spannung erniedrigt, als wenn sie erhöht worden war. Um diese Erscheinung genauer zu untersuchen, brachte ich die Brücke bei 5000 Volt zum Einstehen, öffnete den Strom und ließ die Brücke eine Viertelstunde lang stromlos stehen. Nach dieser Zeit wurde der Strom plötzlich wieder geschlossen, wobei die Spannung wie früher 5000 Volt betrug. Der Ausschlag am optischen Telephon war zuerst erheblich, ging jedoch im Laufe von etwa einer Minute auf Null zurück. Als hierauf die Spannung plötzlich auf 2000 Volt erniedrigt wurde, blieb das Bild zunächst vollkommen scharf, im Laufe einiger Minuten aber entstand ein Ausschlag. Diese Beobachtungen habe ich wiederholt in den verschiedensten Variationen und an verschiedenen Tagen ausgeführt. Das Ergebnis war immer dasselbe und ließ sich völlig unzweifelhaft feststellen.

Damit ist nachgewiesen, daß auch hier die Brückeneinstellung bei den verschiedenen Spannungen genau dieselbe und daß die bei den Messungen gefundene Zunahme von w_2 mit der Spannung auf eine Fehlerquelle zurückzuführen ist. Von dieser stand zunächst nur fest, daß sie eine gewisse Zeit brauchte, um voll zur Geltung zu kommen. Daß sie in einer Wärmewirkung bestand, war außerordentlich wahrscheinlich, und es war deshalb wünschenswert, festzustellen, in welcher Weise und in welchem Maße eine Temperaturerhöhung des Dielektrikums den Verlust beeinflussen würde.

Zu diesem Zwecke stellte ich folgenden Erwärmungs-

versuch an: Derselbe Thermometerkugel-Kondensator wurde in ein Ölbad (Paraffinöl) gebracht, das mit Hilfe einiger stromdurchflossener Drahtwindungen geheizt werden konnte. Die Temperatur des Ölbadetes wurde durch ein eingesenktes Thermometer gemessen. Die Anordnung der Brücke wurde im übrigen unverändert gelassen. Nachdem der Kondensator und sein Ölbad eine Zeitlang sich selbst überlassen worden waren, damit alle Teile die Zimmertemperatur ($18,5^{\circ}\text{C.}$) annehmen konnten, wurde zunächst bei geöffnetem Heizstrom eine Messungsreihe bei verschiedenen Spannungen ausgeführt, die mit der in Tab. 3 wiedergegebenen übereinstimmte. Hierauf wurde die Spannung auf 3300 Volt eingestellt und unverändert gelassen und der Heizstrom geschlossen. Schon wenige Augenblicke nach dem Schließen des Heizstromes begann das Spaltbild im Spiegel des optischen Telephons unscharf zu werden. Die Temperatur des Ölbadetes wurde nun während ungefähr einer Viertelstunde möglichst konstant auf 22° gehalten. Die nach Ablauf dieser Zeit ausgeführte Messung ergab:

$$w_3 = 10200 \Omega, \quad w_4 = 10000 \Omega, \quad w_2 = 197000 \Omega.$$

Als nunmehr die Temperatur des Ölbadetes auf 24° erhöht wurde, ergab sich bei der nach 4 Min. vorgenommenen Messung:

$$w_3 = 10130 \Omega, \quad w_4 = 10000 \Omega, \quad w_2 = 218000 \Omega.$$

Zum Vergleich führe ich zwei von den vor Einschaltung der Heizung bei $18,5^{\circ}$ Ölbadtemperatur erhaltenen Messungsergebnissen an:

E	w_3	w_4	w_2
3300	10 300	10 000	172 000
5000	10 250	10 000	195 000

Die bei 22° Ölbadtemperatur erhaltenen Werte sowohl der Kapazität (w_3) wie auch des Verlustes (w_2) stimmen also sehr nahe mit jenen überein, die sich bei 5000 Volt ergeben haben. Eine überschlägliche Berechnung der bei 5000 Volt in dem untersuchten Kondensator in einer Minute entwickelten Wärmemenge ergibt 1,2 g-Cal., einen gar nicht so unerheblichen Betrag, wenn man die geringe Wärmekapazität der Thermometerkugelschale berücksichtigt, deren Volumen sich, eine Wandstärke von 0,2 mm vorausgesetzt, zu $0,18 \text{ cm}^3$ berechnet.

Ich glaube demnach die Ansicht aussprechen zu dürfen, daß auch im Falle dieser dünnwandigen Thermometerkugel der Verlust an sich das Quadratgesetz genau befolgt, d. h. daß auch hier w_2 bei allen Spannungen dasselbe ist und daß die bei zunehmender Spannung beobachtete Zunahme von w_2 und der Kapazität nur durch einen sekundären Einfluß, nämlich die Temperaturerhöhung verursacht ist, die das Dielektrikum infolge des in ihm stattfindenden Verlustes erfährt, daß diese Zunahme also keine Änderung mit der Spannung, sondern eine solche mit der Temperatur darstellt.

Dadurch erklärt es sich auch ohne weiteres, warum bei der im ersten Beispiel angeführten Messungsreihe an dem Flintglasrohr sich nicht die geringste Änderung von w_2 ergeben hat. Während nämlich die Wärmekapazität dieses Kondensators viele Male so groß war als im letzten Beispiele, betrug der Verlust bei gleicher Spannung, dem ja hier w_2 sehr nahe proportional ist, und damit auch die im Dielektrikum in derselben Zeit entwickelte Wärmemenge weniger als $\frac{1}{3}$ des an der Thermometerkugel beobachteten Betrages.

Noch von einem anderen Gesichtspunkte aus entbehrt vielleicht die hier beobachtete Zunahme des Verlustes im Glase bei kleinen Temperaturerhöhungen nicht des Interesses. Wie nämlich A. Wüllner und M. Wien¹⁾ gezeigt haben, weist auch die Leitfähigkeit des Glases schon bei kleinen Temperaturerhöhungen eine Zunahme auf, die Hand in Hand mit einer Zunahme der Dielektrizitätskonstante geht. Diese Analogie scheint direkt auf einen inneren Zusammenhang des im wechselnden elektrischen Felde auftretenden Verlustes mit der Leitfähigkeit hinzuweisen und kann deshalb wohl als eine Stütze der Anschauung betrachtet werden, daß der Verlust durch Leitungsvorgänge irgendwelcher Art verursacht ist.

Ich lasse noch ein Beispiel einer Messungsreihe folgen, bei der eine Zunahme von w_2 bei steigender Spannung stattfand und bei der sich diese Zunahme ebenfalls deutlich als durch die Temperatur- und nicht durch die Spannungszunahme verursacht ergab.

3. Ein Rohr aus Ebonit von 41 cm Länge, 16 cm äußerem

1) A. Wüllner u. M. Wien, Ann. d. Phys. 9. p. 1217. 1902.

Durchmesser und 2 mm Wandstärke wurde etwa 3 cm tief in einen Paraffinblock eingeschmolzen, an dem vorher eine 10 cm tiefe Nut von solchen Abmessungen ausgedreht worden war, daß an der Innen- und Außenseite des Ebonitrohres je ein ringförmiger Hohlraum von 1 cm Breite im Paraffinblock frei blieb. In diese Hohlräume wurde gleich hoch an der Innen- und Außenseite des Rohres Quecksilber und darüber Öl gefüllt. Die Ergebnisse einer der Messungsreihen, die hierbei angestellt wurden, sind in Tab. 4 enthalten.

Tabelle 4.

E	w_2	Δw_2
2300	240 000	5000
2800	240 000	
3600	240 000	
4600	247 000	
6000	252 000	
7400	265 000	

Auch hier ließ sich das allmähliche Zunehmen von w_2 beim Erhöhen und Abnehmen beim Erniedrigen der Spannung klar erkennen, das deutlich zeigt, daß w_2 sich nicht mit der Spannung, wohl aber mit der Temperatur ändert.

4. Wie aus dem Bisherigen wiederholt zu erkennen war, machte ich von dem Paraffin als Isolationsstoff in sehr ausgedehntem Maße Gebrauch. Dies war jedoch nur unter der Bedingung zulässig, daß das Paraffin nicht etwa selbst einen Verlust aufwies und dadurch eine neue Fehlerquelle mit sich brachte. Um nun zu erkennen, ob gegen die Anwendung des Paraffins als Isolationsmittel von diesem Gesichtspunkte aus wirklich nichts einzuwenden wäre, stellte ich einen Paraffinkondensator her. Die Belegungen in Form von drei je 1 mm starken Zinkblechplatten vom Formate 13.15 cm wurden mit je 3 mm Abstand voneinander vollständig in Paraffin eingeschmolzen. Das Paraffin, das ebenso wie das sonst verwendete ziemlich rein war, wurde filtriert und zur Vermeidung von Luftblasen in dünnen Schichten nach und nach aufgegossen. Der fertige Kondensator stellte eine etwa 15 mm dicke Paraffinplatte dar. Sobald die Kapazitätseinstellung ausgeführt war, blieb hier das Bild vollkommen scharf bis zur

Spannung von 4500 Volt. Darüber hinaus stellte sich das schon mehrfach erwähnte von den „Spitzenentladungen“ herührende Knistern ein, und schon bei 4800 Volt begann das Bild unscharf zu werden. Bei weiterem Steigern der Spannung ergab sich bei gleichzeitiger Zunahme des Knisterns und Zischens ein mit zunehmender Spannung immer größer werdender Ausschlag, der sich fortwährend in unregelmäßiger Weise änderte und dadurch jede Messung unmöglich machte. Es ist dies ein Beispiel für die schon hervorgehobene Tatsache, daß sich auch durch vollständiges Umhüllen der Belegungen mit dem Dielektrikum die Spitzenentladungen und der durch sie herbeigeführte Energieverlust bei höheren Spannungen nicht beseitigen lassen.

5. Genau dieselbe Erscheinung konnte in einer sehr großen Anzahl von anderen Fällen beobachtet werden. Ich will hier nur noch ein Beispiel anführen, welches zeigt, wie bei einem Dielektrikum mit an sich kleinem Verlust die Spitzenentladungen den Verlust vervielfachen, sobald die Spannung eine höhere ist. Ich wähle dazu eine von den Messungsreihen, die ich an Grissonkondensatorplatten angestellt habe. Bei diesen ist wie im Falle des Paraffinkondensators die Belegung, die hier eine kreisförmige Blechplatte ist, vom Dielektrikum vollständig umhüllt. Wie Tab. 5 zeigt, überflügelte hier der durch w_2 gemessene Verlust, der noch bei 2700 Volt nicht viel größer als bei Flintglas ist, bei 6000 Volt schon den bei der Thermometerkugel gefundenen. Die Begleiterscheinungen dieser Erhöhung von w_2 sind immer das Knistern und Zischen und die Unstetigkeit des Ausschlages, und schon dadurch ist bei der Beobachtung eine Verwechselung dieses Verlustes mit dem zu messenden Verlust unmöglich gemacht.

Tabelle 5.

E	w_2	Δw_2
2700	75 000	5000
4650	90 000	2500
6000	175 000	

6. Auch an den Kabeln wurden Spannungsversuche angestellt. Sie hatten alle dasselbe Ergebnis: w_2 blieb bis über

die Betriebsspannung hinaus völlig unverändert. Die Spannungsgrenze, von der an die durch den Verlust selbst verursachte Temperaturerhöhung des Dielektrikums eine merkliche Änderung von w_2 herbeiführt, liegt bei den untersuchten Kabeln wahrscheinlich weit oberhalb der Betriebsspannung.

Das Quadratgesetz ist also, solange die Temperatur konstant bleibt und keine merkliche Spitzenwirkung auftritt, bei allen untersuchten Dielektrizen mit aller Schärfe erfüllt.

Dadurch ist man aber bei Anwendung dieser Methode vollständig der Notwendigkeit enthoben, die Messungen bei hohen Spannungen vorzunehmen, wenn man den Verlust bestimmen will. Man mißt in der Brücke bei niedrigen Spannungen genau dasselbe wie bei hohen, ohne dabei die Schwierigkeiten in Kauf nehmen zu müssen, welche die Messung bei hohen Spannungen mit sich bringt. Man kann im Gegenteil bei niedrigen Spannungen durch Anwendung von Kondensatoren mit genügend großer Kapazität den Einfluß der Fehlerquellen beseitigen und deshalb auch quantitativ richtige Messungen ausführen. Da ferner die Empfindlichkeit der Einstellung bei Verwendung etwas größerer Kapazitäten auch bei niedrigen Spannungen sehr bedeutend gemacht werden kann, besitzt man in der Anwendung der Methode ein einfaches Mittel, über die Größe des Verlustes im Dielektrikum genauen Aufschluß zu bekommen. Über Messungen, bei denen hiervon Gebrauch gemacht wurde, ist im folgenden berichtet.

III. Quantitative Messungen.

Die Versuchsanordnung war bei allen diesen Messungen die durch Fig. 3 dargestellte. Zur Einstellung dienten hier durchweg w_2 und w_3 oder w_4 .

a) Kondensatoren.

Ich führe zunächst in Tab. 6 die Ergebnisse von einigen der Messungen an, die ich in dieser Anordnung an Kondensatoren angestellt habe. Die in dieser Tabelle angegebenen berechneten Werte wurden auf folgende Weise erhalten: Die Ermittlung der Kapazität c_1 des untersuchten Kondensators erfolgte auf Grund der Gleichung

$$c_1 = c_2 \frac{w_4}{w_3}.$$

Den Winkel ψ , auf den sich die beiden nächsten Spalten beziehen, erhält man aus den Daten der Brücke durch die Gleichung

$$\operatorname{tg} \psi = n c_2 w_2,$$

da ja in den Brückenseiten AD und AF die Grundschwingungen des Stromes und der Spannung den gleichen Phasenunterschied untereinander besitzen.

Der in der letzten Kolonne angegebene Verlust bei 1000 Volt in Watt pro Mikrof. ist aus Gleichung (2') erhalten. Diese läßt sich nämlich auch schreiben

$$(2'') \quad \begin{cases} A = n \cdot n c_2 w_2 \cdot c_1 E^2 \\ = n \operatorname{tg} \psi c_1 E^2. \end{cases}$$

Setzt man hierin $c_1 = 10^{-6}$ Farad, $E = 1000$ Volt, so erhält man die in der Tabelle enthaltenen Werte. Die Berechtigung zu diesem Rechnungsvorgange knüpft sich an die beiden Bedingungen, daß der Verlust bei derselben Schwingungszahl proportional der Kapazität und dem Quadrate der Spannung ist.

Die Dielektrika der drei Kondensatortypen, auf die sich Tab. 6 bezieht, weisen, wie man sieht, durchweg kleine Verluste auf. Zu dem über den Glimmerkondensator mitgeteilten Versuchsergebnis ist zu bemerken, daß die einzelnen Ab-

Tabelle 6.

	Schwingungszahl $n/2\pi$	E	c_2 in Mikrof.	w_3	w_4	w_2	Δw_1	c_1 in Mikrof.	$\operatorname{tg} \psi$	ψ	Verlust bei 1000 Volt in Watt pro Mikrof.
Präzisionsglimmerkondensator von Siemens & Halske	85,8		$2,02 \cdot 10^{-3}$	108,0	500	6600	250	$9,81 \cdot 10^{-3}$	0,00717 ₆	$0^\circ 24' 40''$	3,86 ₆
	86,1	1500	$1,61_9 \cdot 10^{-3}$	802,1	200	4500	380	$1,00_6 \cdot 10^{-3}$	0,00369 ₇	0 12 40	1,99 ₉
Leidener Flasche aus Flintglas	86,1	1500	"	577,8	500	12200	380	$1,31_4 \cdot 10^{-3}$	0,0100 ₂	0 34 30	5,42 ₂
11 Grissonkondensatorplatten	50,1	1200	"	572,4	"	23600	1000	$1,92_7 \cdot 10^{-3}$	0,0112 ₉	0 38 50	3,55 ₂

teilungen dieses Kondensators sehr verschiedenen Verlust zeigten; die angeführte Messung bezieht sich auf jene seiner Abteilungen, die den größten Verlust von allen aufwies. Ihre Kapazität war mit 0,01 Mikrof. angegeben. Ganz außerordentlich klein ist der Verlust der Flintglasflasche. Diese Glasart zeigte, von Paraffin abgesehen, überhaupt den kleinsten Verlust von allen festen Körpern, die ich untersuchen konnte. Die Ergebnisse der beiden mit den Grissonkondensatorplatten bei 86 und 50 Schwingungen angestellten Versuche sind insofern nicht genau vergleichbar, als möglicherweise eine oder zwei von den Platten in beiden Fällen nicht dieselben waren.

b) Kabel.

Viel ausgedehntere Anwendung als die eben beschriebene habe ich von der Methode zur Untersuchung der Kabel gemacht, worüber an anderer Stelle berichtet werden soll. Hier seien nur kurz die Ergebnisse dieser Messungen angeführt:

1. Das Quadratgesetz war, wie erwähnt, bei den untersuchten Kabeln bis über die Betriebsspannung hinaus genau erfüllt.

2. Messungen in verschiedenen Gruppierungen der Leiter eines und desselben Kabels (den Mantel inbegriffen) ergaben die Proportionalität des Verlustes mit der Kapazität des untersuchten Kondensators.

3. Der Verlust im Dielektrikum der untersuchten Kabel ist klein. Wie aus Tab. 7 zu ersehen ist, in der Resultate je einer Messung an jedem Kabel wiedergegeben sind, weist sogar eines der Kabel (III) einen nur um wenig größeren Verlust als Flintglas auf.

4. *Zusammenhang des Verlustes in den Kabeln mit der Schwingungszahl.* Direkt miteinander in dieser Hinsicht vergleichbar sind nur die an den Kabeln VIII, IX und X vorgenommenen Versuche. Zwischen den Messungen mit den beiden Schwingungszahlen lag bei diesen drei Kabeln nur ein Zeitraum von 1—2 Wochen, und die Messungen mit beiden Schwingungszahlen wurden unter denselben Verhältnissen vorgenommen. Bei den anderen Kabeln wurde die eine Messung (86 Schwingungen) im Winter im geheizten Zimmer ausgeführt, während die andere in die warme Jahreszeit fällt, in welcher

Tabelle 7.

Nr.	Betriebs- spannung in Volt	Kupfer- querschnitt in mm ²	Länge in m	Isolationsart	$\frac{n}{2\pi} = 86$		$\frac{n}{2\pi} = 50$		Hergestellt durch
					tg ψ	ψ	tg ψ	ψ	
I	20000	3.32	5,4	Imprägn. Papier	0,02301	1°19' 5"	0,03920	2°14' 41"	Allg. Elektrizitäts- Gesellschaft, Berlin Kabelwerk Oberspreer
II	11000	3.95	5,3	"	0,01619	0 55 39	0,01829	1 2 52	
III	10000	3.70	5,1	Gummi u. impr. Jute	0,003321	0 13 8	0,005081	0 17 28	
IV	3000	3.16	11	Imprägn. Papier	0,007436	0°25' 34"	0,009994	0°34' 21"	Siemens-Schuckert- Werke, G. m. b. H. Kabelwerk Westend b. Berlin
V	5000	3.10	16	"	0,008546	0 29 23	0,009610	0 33 2	
VI	700	3.50	6	"	0,009779	0 33 37	0,009659	0 33 12	
VII	700	2.25	6	"	0,010765	0 37 0	0,011763	0 40 26	
VIII	700	2.16	7	"	0,016271	0 55 56	0,016592	0 57 2	Feltens & Guilleaume- Lahmeyerwerke, A.-G. Carlswerk, Mülheim a. Rhein
IX	5000	4.25	20	Imprägn. Papier	0,014956	0°51' 25"	0,015109	0°51' 56"	
X	5000	3.25	20	"	0,015285	0 52 32	0,014966	0 51 27	

alle Kabel einen etwas größeren Verlust zeigten. Vergleicht man nun bei den drei Kabeln VIII, IX und X die Werte für ψ , bez. $\operatorname{tg} \psi$ bei beiden Schwingungszahlen miteinander, so findet man sie bis auf 2 Proz. und weniger einander gleich. Eine ähnliche, wenn auch aus dem angegebenen Grunde nicht durchweg so genaue Übereinstimmung zeigen alle anderen Kabel mit Ausnahme des Kabels I. Bildet man bei diesem für jede Schwingungszahl das Produkt $n \operatorname{tg} \psi$, so ergibt sich dieses Produkt nahezu gleich für beide Schwingungszahlen.

Was dies bedeutet, ist sofort aus Gleichung (2'') zu erkennen. Bleibt das Produkt $n \operatorname{tg} \psi$ konstant, so ist der Verlust unabhängig von der Schwingungszahl. Das Dielektrikum des Kabels I verhält sich also in bezug auf den Verlust wie ein Ohmscher Widerstand. Der Verlust in ihm ist unabhängig von der Schwingungszahl und nur durch die Spannung bestimmt, er ist wahrscheinlich vorherrschend durch Leitung verursacht. Ganz anders verhalten sich aber die übrigen Kabel. Bei ihnen ist bei den beiden von mir benutzten Schwingungszahlen ψ nahezu konstant geblieben, d. h. nach Gleichung (2'') der Verlust ist bei ihnen bei gleicher Kapazität und Spannung proportional der Schwingungszahl.

Natürlich läßt sich auf Grund der Messungen bei diesen beiden Schwingungszahlen noch kein abschließendes Urteil über den Zusammenhang des Verlustes mit der Schwingungszahl fällen. Um diesen genauer zu untersuchen, müßte man einerseits mehrere Schwingungszahlen heranziehen, andererseits die Messungen so einrichten, daß ihre Ergebnisse direkt miteinander vergleichbar sind. Immerhin ergibt sich daraus eine ziemlich einfache für die technisch gebräuchlichen Schwingungszahlen gewiß genügend genau gültige Beziehung für den Verlust in Kabeln ohne merkliche Leitung. Es ist, wenn mit ν die Schwingungszahl pro Sekunde und mit c die Kapazität des Kabels bezeichnet wird:

$$A = k \cdot \nu \cdot c \cdot E^2, \text{ worin } k = 2 \pi \operatorname{tg} \psi.$$

Es kann also die Phasenverschiebung ψ für ein bestimmtes Dielektrikum als eine Materialkonstante im Bereich der technisch üblichen Schwingungszahlen betrachtet werden. $2 \pi \operatorname{tg} \psi$

wäre der während eines Zyklus in einem Kondensator von der Kapazität 1 bei der Spannung 1 auftretende Verlust.

Das Kabel II wurde auch noch rechnerisch daraufhin untersucht, welche Rolle der Verlust in seinem Dielektrikum bei der Fortpflanzung von Wechselströmen längs seiner Leiter spielt. Eine wesentliche Beeinflussung der am Kabel auftretenden Spannungs-, Strom- und Phasenverhältnisse ließ sich nicht nachweisen, doch ergab die Rechnung ein nicht uninteressantes Resultat in bezug auf die im unbelasteten, also am Ende offenen Kabel verloren gehende Energie: Bei kleineren und mittleren Längen des Kabels bildet der Verlust im Dielektrikum den weitaus größten Teil der im offenen Kabel verbrauchten Leistung, und erst bei sehr großen Längen tritt er hinter dem Stromwärmeverlust in den Kupferleitern zurück. Er beträgt z. B. noch bei 50 km Länge des Kabels fast das Doppelte und erst bei 200 km Länge etwa ein Zehntel des Verlustes im Kupfer.

Um die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen kurz zusammenzufassen, führe ich an:

1. Das Quadratgesetz ist bei allen untersuchten Dielektrizis (verschiedenen Glasarten, Ebonit, Dielektrikum der Grissonkondensatorplatten, imprägniertem Papier, Gummi, imprägnierter Jute) mit aller Schärfe erfüllt, sofern es wirklich nur die Spannung ist, die bei den Versuchen verändert wird.

2. Scheinbare Abweichungen vom Quadratgesetz ergeben sich, sobald noch eine andere Größe, unter deren Einfluß der Verlust steht, z. B. die Temperatur, verändert wird, und zwar nimmt der Verlust in den daraufhin untersuchten Dielektrizis Glas und Ebonit schon bei kleinen Temperaturerhöhungen des Dielektrikums merklich zu.

3. Eine weitere scheinbare Abweichung vom Quadratgesetz weist der Verlust in einem Kondensator bei hohen Spannungen dann auf, wenn dieser so beschaffen ist, daß „Spitzenentladungen“ an ihm auftreten. In diesem Falle wächst der Spitzenentladungsverlust, der erheblich schneller als mit dem Quadrate der Spannung zunimmt, bei hohen Spannungen bald so an, daß der im Dielektrikum selbst ver-

loren gehende Energiebetrag im Vergleich zu ihm fast gar nicht mehr in Betracht kommt.

4. Der Energieverlust im Dielektrikum ist proportional der Kapazität und kann bei den Kabeln im Bereiche der in der Technik üblichen Schwingungszahlen als proportional der Schwingungszahl angesehen werden.

5. Der Betrag des Energieverlustes weist, obgleich nur Dielektrika mit verhältnismäßig kleinem Verlust ausgewählt worden sind, ziemlich große Unterschiede bei den verschiedenen untersuchten Stoffen auf. Insbesondere zeigte sich bei Glas bedeutende Verschiedenheit des Verlustes je nach der Glasart. Den geringsten Verlust unter allen untersuchten festen Körpern, von Paraffin abgesehen, ergab Flintglas, und nur wenig größer war der des mit Gummi und imprägnierter Jute isolierten Kabels.

6. Infolge der genauen Erfüllung des Quadratgesetzes bleibt die Größe, durch die bei der hier benutzten Methode der Verlust gemessen wird, bei allen Spannungen dieselbe, und es fällt deshalb jede Veranlassung fort, die Messungen bei hohen Spannungen vorzunehmen. Da sich schon an Kapazitäten von 0,001 Mikrof. aufwärts auch bei verhältnismäßig niedrigen Spannungen genaue Verlustmessungen anstellen lassen, bietet die Methode ein bequemes Mittel zur Bestimmung des Energieverlustes im Dielektrikum. Bei Kabeln insbesondere lassen sich schon an Stücken von wenigen Metern Länge bei 1100—1500 Volt weitaus genauere Messungen ausführen, als dies bei den bisher benutzten Methoden bei Längen von mehreren hundert Metern und viel höheren Spannungen möglich ist.

Danzig, Physik. Institut der Technischen Hochschule,
Juni 1906.

(Eingegangen 28. Februar 1907.)