Über Rückstandsbildung und Oscillationen bei verschiedenen Condensatoren

Theodor Wulf S. J.

Aus dem physikalischen Institute der k. k. Universität in Innsbruck.

(Mit 2 Tafeln und 2 Textfiguren.)

Bei der grossen Bedeutung, welche die Vorgänge im Dielektricum der Condensatoren für Theorie und Praxis haben, dürften einige Untersuchungen, die darüber im Laufe dieses Jahres angestellt wurden, nicht ohne Interesse sein.

Dieselben beziehen sich zunächst auf die Erscheinung des Rückstandes, seine Ausbildung und seine Entladung, sodann auf die genauere Gestalt der Wellen bei oscillatorischen Condensatorentladungen, endlich auf den Energieverlust im Dielektricum, den man bei solchen Schwingungen wahrgenommen hat.

Die Anregung zu diesen Arbeiten verdanke ich meinem verehrten Lehrer Herrn Prof. Dr. I. Klemenčič, der mir nicht nur seinen ausgezeichneten Hiecke'schen Fallapparat zur Verfügung stellte, sondern mich auch bei der Ausführung dieser Untersuchungen durch Rath und That bereitwilligst unterstützte, wofür ich ihm zu grösstem Danke verpflichtet bin.

I. Die Versuchsobjecte.

Es wurden im Ganzen vier Condensatoren untersucht, zwei, welche die Erscheinung des Rückstandes zeigen, und zwei, die rückstandsfrei sein sollten.

1. Ein Condensator aus Paraffinpapier von Keyser & Schmidt in Berlin. Er hatte nach Angabe der Fabrik

5 Mikrofarad, die einzeln gebraucht werden konnten. Der Isolationswiderstand wurde bestimmt aus der Elektricitätsmenge, welche zwischen den Belegen überging bei einer constanten Potentialdifferenz. Derselbe nahm mit erhöhtem Ladungspotential bedeutend ab und war dann dauernd verringert. Mit 1 Clark'schen Normalelement $= 1 \cdot 435$ Volt geprüft, war der Widerstand $14 \cdot 10^6\ \Omega$, mit 12 Normalelementen $= 17 \cdot 2$ Volt nur mehr $8 \cdot 10^6\ \Omega$. Darauf wurden mit dem Condensator Schwingungsbeobachtungen vorgenommen, wobei er einer Spannung bis zu 150 Volt ausgesetzt wurde. Hernach zeigte er, mit denselben 12 Normalelementen geladen, nur mehr $4 \cdot 10^6\ \Omega$.[1] Die Rückstandsbildung war so stark, dass die gewöhnliche Prüfung auf Isolation durch Bestimmung des Ladungsverlustes während einer längeren Zeit hier nicht stattfinden konnte, da fast die ganze Ladung in Rückstand überging und nur sehr langsam wieder zum Vorschein kam. In der Folge soll dieser Condensator kurz mit Paraffin Pap. Cond. II bezeichnet werden.

2. Erstaunt über die schlechten Eigenschaften dieses Condensators wünschte ich zu wissen, ob es denn nicht möglich sei, bessere Condensatoren aus Paraffinpapier herzustellen. Es wurde klares, weisses Paraffin in einer flachen Wanne flüssig gemacht und dann gewöhnliches reines Schreibpapier durch die flüssige Masse gezogen. Nach einiger Übung erhielt man auf beiden Seiten eine sehr gleichmässige glatte Paraffinschicht. Aus etwa 120 solcher Bogen von gewöhnlichem Folioformat und Stanniolblättern wurde ein Condensator aufgebaut, der sich dann dem ersteren weitaus überlegen zeigte. Die Capacität betrug anfangs $1 \cdot 02$ Mikrofarad bei circa 1 Secunde Ladungsdauer, nahm jedoch im Laufe des Jahres, wie die Massen noch zusammenrückten, bis $1 \cdot 24$ MF. zu. Rückstandsbildung war natürlich vorhanden, betrug jedoch nur $^1/_4$ derjenigen des anderen Condensators. Das Isolationsvermögen war ebenfalls ein ausgezeichnetes. Anfangs wurde gemessen

---

[1] Es ist also bei derartigen Arbeiten mit Condensatoren durchaus unzulässig, den Isolationswiderstand vielleicht mit einigen Elementen zu bestimmen und dann bei 1000 und mehr Volt als richtig anzusehen. In dieser Arbeit wurde immer die Vorsicht gebraucht, dass der Widerstand bei einer Spannung bestimmt wurde, die über derjenigen der Maxima bei den Oscillationen lag.

bei 10 Volt. .5000·10⁶ Ω,
60 ...4500·10⁶ Ω.

Schon bei diesem Condensator, ganz besonders aber bei den zwei folgenden, zeigte sich eine ungemein grosse Empfindlichkeit für die Feuchtigkeit der Luft, wodurch dann die Rückstandsbildung scheinbar[1] vermehrt und die Isolation verringert wurde. So hatte dieser Condensator nach einigen Wochen nur mehr $1600 \cdot 10^6\ \Omega$ Widerstand, gemessen bei 17·2 Volt. Es wurden deshalb alle Condensatoren in einem möglichst luftdicht schliessenden Kasten, in welchem sich flache Schalen mit H_2SO_4 conc. befanden, aufbewahrt und nur auf kurze Zeit zum Gebrauche hervorgeholt. In diesem Kasten nahm das Isolationsvermögen, bei denselben 17·2 Volt gemessen, in vier Wochen wieder bis $2100 \cdot 10^6\ \Omega$ zu. In Zukunft wird dieser Condensator einfach mit Paraff. Pap. Cond. I bezeichnet werden.

3. Ein Glimmercondensator. Derselbe war ganz neu von Edelmann in München geliefert, hatte eine Capacität von $1 \cdot 1 + 0 \cdot 0002$ MF. Die Bestimmung wurde mit dem ballistischen Galvanometer vorgenommen nach der Formel

$$C = \alpha \frac{G T_0}{\pi V} e^{\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc\,tang} \frac{\pi}{\lambda}}$$

Die Capacität erwies sich anfangs als ziemlich unabhängig von der Ladungsdauer; als der Condensator jedoch während eines anhaltenden feuchten Wetters ohne besonderen Schutz gelassen war, zeigte er Rückstandsbildung, und die Capacität nahm mit der Ladungsdauer zu. Er wurde jetzt vier Wochen im Trockenraum abgeschlossen und zeigte sich darauf fast rückstandsfrei. Das Isolationsvermögen betrug nach verschiedenen Messungen stets über $10.000 \cdot 10^6\ \Omega$. Er wurde dann auch als Normalcondensator benützt zur Bestimmung der Capacität der übrigen.

---

[1] Die scheinbare Vermehrung der Rückstandsbildung dürfte vielleicht auf eine elektrolytische Polarisation der feuchten Schichten durch den Ladestrom zurückzuführen sein, worüber erst eine weitere Untersuchung Aufschluss geben könnte.

4. Ein Condensator aus reinem Paraffin. Die Beschaffung dieses Condensators hatte grosse Schwierigkeit, da die Beobachtung mit dem Hiecke'schen Fallapparat wenigstens etwa 0·3 Mikrofarad Capacität erfordert. So grosse Paraffincondensatoren sind im Handel nicht zu haben und bisher wohl überhaupt noch nicht hergestellt worden. Der Grund liegt offenbar in der ausserordentlichen Schwierigkeit, welche es hat, eine so grosse Anzahl hinreichend dünner Blätter dieses sehr brüchigen Materials herzustellen.

Es wurde nun zuerst versucht, die Stanniolblätter selbst in heisses Paraffin zu tauchen. Allein bei dem grossen Wärmeleitungsvermögen des Metalls blieb fast nichts haften. Dazu kam noch, dass die Ausdehnungscoëfficienten von Stanniol und Paraffin sehr ungleich sind, weshalb die Blätter über und über mit Runzeln und Falten sich bedeckten. Endlich zeigte es sich als das beste, heisses Paraffin mit einem Pinsel auf die Stanniolblätter aufzutragen, während dieselben auf einem möglichst kalten Stein glatt auflagen, und dann bis zum völligen Auskühlen durch sanftes Pressen am Werfen zu verhindern. Alsdann wurde Blatt für Blatt auf seine Isolation geprüft und so allmälig der Condensator aufgebaut. Das Ganze wurde dann in einer Copirpresse stark gepresst, um die Luft zu entfernen. Da aber gleichwohl noch kleine Runzeln und Unebenheiten vorhanden waren, so bestand also das Dielektricum dieses Condensators aus reinem Paraffin und Luft. Die Capacität wurde drei Wochen nach der Anfertigung zu 0·465 Mikrofarad gemessen, stieg aber allmälig bis zu 0·473 MF. Das Isolationsvermögen war anfangs $4000 \cdot 10^6\ \Omega$, sowohl mit 1, als auch mit 12 Cl. N. El. gemessen. Der Condensator war einstweilen noch nicht geschützt, weshalb sich die Feuchtigkeitsverhältnisse in ganz auffallender Weise bemerkbar machten. So zeigte er einmal nur $800 \cdot 10^6\ \Omega$ und dann wieder $1400 \cdot 10^6\ \Omega$.

II. Die Apparate.

Was zunächst den Fallapparat betrifft, so muss auf die Abhandlung des Erfinders selbst verwiesen werden.[1] Das

---

[1] R. Hiecke, dies Sitzungsber., 96. Bd., II. Abth., 1887, S. 134.

Wesen des Apparates liegt darin, dass ein an einem gespannten Messingdraht *AA* (Fig. 1) hinabgleitendes Gewicht zwei Contacthebelchen a_1, a_2 in sehr kleinen, aber doch genau messbaren Zeitintervallen nacheinander öffnet. Von den Hebelchen ist das eine a_1 mittelst einer Mikrometerschraube in verticaler Richtung verschiebbar, wodurch man das Zeitintervall beliebig variiren kann. Die Zeit, welche das Gewicht braucht, um den Weg eines Schraubenganges zurückzulegen, ist

$$T = 0\cdot 000166 \text{ Secunden.}$$

An der Schraubenspindel ist eine Trommel mit 100 Theilstrichen angebracht, so dass also ein Trommeltheilstrich mit $1\cdot 66\cdot 10^{-6}$ Secunden äquivalent ist. Diese Zeit wurde bestimmt durch die Entladung eines Condensators von bekannter Capacität C durch einen grossen Widerstand R nach der Formel

$$Q = Q_0 e^{-\frac{t}{CR}}$$

folglich

$$t = CR(lQ_0 - lQ).$$

Das Galvanometer war ein Wiedemann'sches Schlittengalvanometer. Die Rollen hatten zusammen 20.000 Windungen aus feinem Cu-Draht mit einem Gesammtwiderstande von 31.870 Ω. Die Dauer der einfachen Schwingung war immer gegen 7·5 Secunden. Ein Condensator von 1 MF. zu 1 Volt geladen gab einen Ausschlag von 77 Scalentheilen, so dass also ein Ausschlag von 1 Scalentheil eine Elektricitätsmenge von $13\cdot 10^{-18}$ Coulomb anzeigt. Wo in Zukunft nichts Anderes bemerkt ist, wird diese Empfindlichkeit vorausgesetzt.

Zur Ladung wurden Accumulatoren von 2·1 Volt verwendet, die sich bei häufig wiederholten Vergleichen mit einer Batterie von Clark'schen Normalelementen als sehr constant erwiesen.

Die Rollen. Damit bei der Entladung der Condensatoren Oscillationen von hinreichend grosser Schwingungsdauer entstehen, werden Rollen mit grosser Selbstinduction in den Entladungsweg eingeschaltet. Diese Rollen müssen vor Allem einen möglichst kleinen Widerstand haben, damit der

Energieverbrauch in den Drähten möglichst gering sei. Es wurden hauptsächlich drei Rollen gebraucht (mit L, M und R bezeichnet), die alle drei eigens für diese Versuche angefertigt wurden. Da Metallkerne einen Energieverlust durch Foucault'sche Ströme erzeugt haben würden, so wurden sie auf Holzhülsen gewickelt, die vorher in Paraffin gut ausgekocht waren. Zwei Drahtwindungen verliefen bifilar, die vier Enden führten zu je einer Klemmschraube. Diese Methode der Wickelung gewährte den Vortheil, dass die Rollen »Auf Selbstinduction« und »Inductionslos« und dabei die beiden Windungen in Serie oder parallel geschaltet werden konnten; was jedoch das Wichtigste war, sie erlaubte die zwei Hälften vollständig von einander zu trennen und auf ihre gegenseitige Isolation zu prüfen; hatte jedoch den Nachtheil, dass bei den Oscillationen Windungen mit grosser Potentialdifferenz unmittelbar neben einander lagen und so die Rolle eine verhältnissmässig grosse Capacität besass.

Die Constanten der Rollen waren folgende:

Rolle L aus Cu-Draht, doppelt mit Seide übersponnen und in Paraffin getränkt.

Widerstand $10\cdot 9\ \Omega$. Coëfficient der Selbstinduction $244\cdot 5$ Klm. (Mittel aus zwei Bestimmungen mit der Wheatstone'schen Brücke). Die Isolation war, mit 1 N. El. gemessen, $57\cdot 10^6\ \Omega$, bei 60 Volt $10^6\ \Omega$.

Rolle M aus doppelt mit Wolle übersponnenem Cu-Draht. Widerstand $\Omega = 10\cdot 4$. Isolation der Windungen bei 1 N. El. $12\cdot 10^6\ \Omega$., bei 10 Volt $8\cdot 10^6\ \Omega$.

Da es schien, dass beide Rollen mit der Zeit schon eine ziemliche Menge Feuchtigkeit angezogen hatten und nicht mehr hinreichend isolirten (es war R gegen $600\cdot 000\ \Omega$) auch eine grössere Rückstandsladung hatten, so wurde für die letzten Beobachtungen noch eine dritte Rolle gewickelt.

Rolle R. Der doppelt mit Wolle umsponnene Cu-Draht wurde durch heisses Paraffin gezogen und dann gleich aufgewickelt, so dass alle Fugen sich mit Paraffin ausfüllten. Der Isolationswiderstand betrug, bei 12 N. El. gemessen, $14\cdot 10^6\ \Omega$, der Widerstand des Drahtes $8\cdot 14\ \Omega$.

III. Die Rückstandsbildung.

Die Ausbildung und Entladung des Rückstandes sind zwar oft Gegenstand physikalischer Untersuchungen gewesen, doch erlaubten die bisherigen Methoden nicht, die Rückstandsbildung namentlich in den ersten, sehr kleinen Zeiten nach der Ladung zu verfolgen, wo die Eigenart der Ladungscurve gerade am

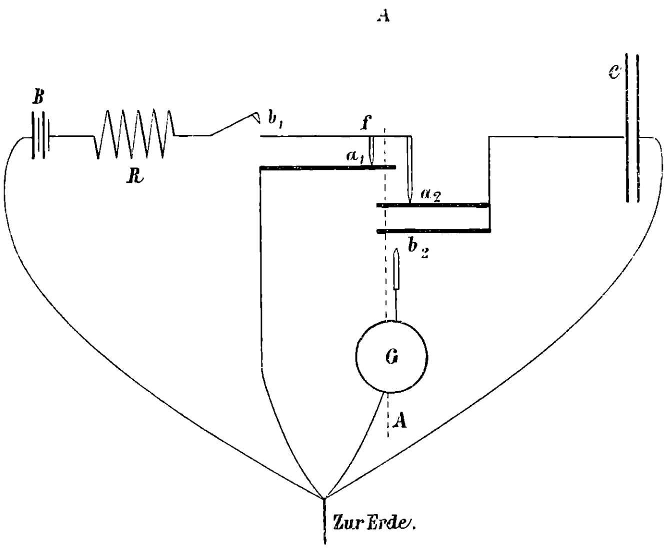


Fig. 1.

deutlichsten hervortritt. Fig. 1 zeigt die Schaltung des Fallapparates für die Beobachtung der Ausbildung des Rückstandes. a_1 und a_2 sind die beiden Öffnungscontacte. B ist die ladende Batterie, C der Condensator, G das Galvanometer, b_1 und b_2 sind zwei Hilfsvorrichtungen, die erste, um den Strom zu schliessen, die zweite, um den Condensator durch das Galvanometer zu entladen.

Zu Beginn der Ladung sind a_1 und a_2 geschlossen, b_1 und b_2 offen.

Durch einen Hilfsstrom wird der Eisenfaden, an welchem das Fallgewicht hängt, abgebrannt und zugleich der Strom bei b_1 geschlossen, der jetzt durch fa_1 zur Erde abfliesst.

Bei f zweigt sich durch den Contact a_2 eine Leitung zum Condensator ab. Es muss deshalb ein Widerstand R vorgeschaltet werden, damit das Potential bei f schon sehr klein ist. Gewöhnlich wurde $R = 10\,\Omega$ genommen, was sich als völlig ausreichend erwies.

Durch das Fallgewicht wird nun bei a_1 unterbrochen und der ganze Strom durch fa_2 in den Condensator geleitet. Gleich darauf aber wird auch a_2 geöffnet, wodurch der Condensator von der Batterie wieder getrennt wird. Die Ladung bleibt jetzt im Condensator, bis das Gewicht den Contact b_2 herabdrückt und die Condensatorladung durch das ballistische Galvanometer zur Erde abfliessen lässt.

Durch Verschieben des Contactes a_1 kann die Zeit zwischen dem Öffnen von a_1 und a_2 von Null an allmälig vergrössert werden. So lange aber auf eine zu kurze Zeit eingestellt war, so dass durch a_2 im Augenblick des Öffnens noch ein bedeutender Strom floss, sprangen Funken über, und die erhaltenen Ausschläge gingen ganz regellos durcheinander, wenn aber die Ladung nahezu vollendet war, so wurden die Ausschläge sehr constant.

In ähnlicher Weise wurde sodann die Entladung untersucht. Der Condensator wurde eine bestimmte Zeit geladen. dann wurde die Entladung durch einen inductionslosen Widerstand eingeleitet, aber nach einer sehr kurzen, gemessenen Zeit wieder unterbrochen. Der Ladungsrest gibt dann, im Galvanometer gemessen, ein genaues Bild der vorhergehenden Entladung.

Die Schaltung des Apparates ist in Fig. 2 skizzirt.

Sobald der Contact b_1 durch den Hilfsstrom geschlossen wird, fliesst der Strom durch $a_1 f$ und den inductionslosen Widerstand R zur Erde ab; zugleich ladet sich der Condensator durch den Contact a_2 zu dem bei f herrschenden Potential. Wenn $R = 10\,\Omega$ genommen wurde, so war dasselbe von der Klemmspannung der Batterie schon nicht mehr merklich verschieden.

Wird jetzt a_1 geöffnet und dadurch die Batterie isolirt, so beginnt der Condensator sich durch $a_2 fR$ zu entladen, bis dass eine kurze, gemessene Zeit darauf durch Öffnen von a_2

der Rest der Ladung im Condensator isolirt wird. Derselbe wird dann, nachdem b_2 geschlossen ist, im Galvanometer gemessen. Die Zeit, welche zwischen dem Öffnen von a_2 und dem Schliessen von b_2 lag, war constant $= 0 \cdot 01$ Secunden.

Auch hier traten Funken auf, wenn beim Öffnen von a_2 noch ein starker Strom aus dem Condensator kam, und erst, wenn die Entladung an Intensität nachliess, erfolgte eine regelmässige Ablenkung des Galvanometers.

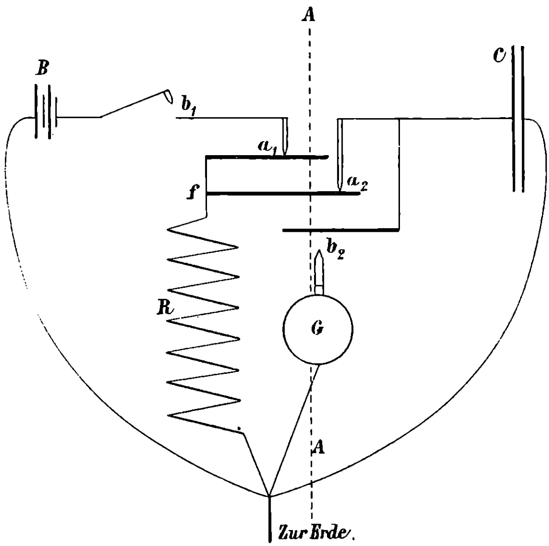


Fig. 2.

Bei den stark Rückstand bildenden Condensatoren hatten diese Beobachtungen besondere Schwierigkeiten. Wenn nämlich die Ladungsdauer allmälig grösser genommen wurde, so wuchs auch die Dauer der Entladung an und war gegenüber der Schwingungsdauer des Galvanometers durchaus nicht mehr klein zu nennen, übertraf dieselbe im Gegentheil zuletzt um ein beträchtliches. Es musste deshalb in die Galvanometerleitung noch eine eigene Vorrichtung zum leichten Unterbrechen und Schliessen des Stromes eingefügt werden. Sobald dann nach Herstellung des Contactes b_2 das Galvanometer sich zu bewegen angefangen, wurde die weitere Entladung unterbrochen, bis das Galvanometer (nach etwa 30 Secunden) sich wieder beruhigt hatte. Darauf wurde abermals auf kurze Zeit entladen und so fortgefahren, bis die Ausschläge sehr klein wurden. Die Summe der so erhaltenen Ausschläge ist dann das Mass für die Ladung. Eine Vernachlässigung dieses Umstandes hätte bei längerer Ladungsdauer einen Fehler bis zu 50% bewirkt. Meist wurden bei jeder Einstellung des Apparates zwei Beobachtungen gemacht mit gewechselten Batteriepolen. Für die ersten sehr kurzen Zeiten jedoch wurden die Beobachtungen noch mehr gehäuft.

Resultate der Rückstandsbeobachtungen.

Paraffinpapier Condensator I.

Die Ladungsbatterie war 1 Accumulator zu 2·1 Volt, $R = 10\,\Omega$. 1 MF. mit diesem Element geladen, gab einen Ausschlag von 157 Scalentheilen.

t bedeutet die Dauer der Ladung in Secunden,

α die während t Secunden aufgenommene Ladung in Scalentheilen.

Tabelle I.

t	α	t	α
0·00005	155	0·003	161·7
0·00008	156	0·5 [1]	185·0
0·00015	156·3	1·0	189·0
0·00040	158	10·0	194·0
0·00060	159·2	15·0	194·7
0·00130	160·0	30·0	195·0

Die Entladung durch denselben Widerstand $R = 10\,\Omega$. Die Ladung geschah 1 Secunde mit demselben Accumulator = 2·1 Volt. α ist in Scalentheilen jener Ladungsrest, der noch vorhanden, nachdem der Condensator t Secunden lang entladen war.

[1] Diese und die folgenden Ladungsdauern wurden dadurch hergestellt, dass a_1 von Anfang an offen blieb. Die Ladung begann beim Schliessen des Hilfscontactes b_1. Nach t Secunden wurde dann das Fallgewicht abgebrannt.

Tabelle II.

t	α	t	α
0·0	189	0·00040	30·7
0·00007	34	0·001	29
0·00010	33	0·003	26
0·00020	31·3		

Die Zahlen zeigen, dass der Condensator in derselben Zeit genau so viel Ladung aufnimmt, als er abgibt; z. B. in 0·0004 Secunden wurden abgegeben nach

Tabelle II . 189—30·7 = 158·3,
aufgenommen nach Tabelle I. 158
in 0·001 Secunden abgegeben 189—29 = 160
aufgenommen nahezu . 160

Paraffinpapier Condensator II.

Ladung mit 1 Accum. = 2·1 Volt 1. durch 10 Ω Widerstand, 2. durch 50 Ω Widerstand.

Tabelle III.

Ladungsdauer in Secunden	Ausschlag α bei 10 Ω	Ausschlag α bei 50 Ω	Ladungsdauer in Secunden	Ausschlag bei 10 oder 50 Ω
0·000033	—	60	0·0043	143
0·000066	121·0	98	0·0058	150
0·000100	125·0	116	0·0116	153·3
0·000200	126·5	125	0·4	255
0·000320	**127·5**	**127·5**	0·5	280
0·000500	130·0	130·0	1	334
0·00100	132·5	132·5	5	406
0·00160	135·5	135·5	15	516
0·0021	138	138	60	618

Es wurde sodann eine Ladungsbeobachtung mit 4 Accum. = 8·5 Volt vorgenommen. Die Ausschläge waren von Anfang an das Vierfache, weshalb die Mittheilung der Zahlen hier füglich unterbleiben kann.

Der vorgeschaltete Widerstand hatte nur im Anfang einen Einfluss auf den Ladungsvorgang, auf die Entwicklung des Rückstandes nicht mehr.

Entladung desselben Condensators durch 10Ω Widerstand. 1. nachdem derselbe 0·5 Secunden, 2. nachdem er 1 Secunde geladen war. α bezeichnet den Ladungsrest nach t Secunden Entladung.

Tabelle IV.

t	Ausschlag α bei der Ladungsdauer 0·5 Secunden	Ausschlag α bei der Ladungsdauer 1 Secunde
0·0	280	334
0·0002	160·5	203
0·0007	159	201
0·0020	157	196
0·0046	149	189
0·01	142	182
1	24	—
2	10	—

Die Angaben über diesen Condensator mögen ein beiläufiges Bild geben von der Entwicklung des Rückstandes, wie sie in den meistens gebrauchten Condensatoren aus Paraffinpapier vor sich geht. So viel sich aus den Angaben über die Änderung der Capacität entnehmen lässt, würden die entsprechenden Zahlen der von Steinmetz,[1] Eisler[2] und Sahulka[3] gebrauchten Condensatoren auch der Grössenordnung nach mit den obigen übereinstimmen.

Auf besondere Genauigkeit können jedoch diese letzten Angaben aus mehreren Gründen keinen Anspruch machen. Vor Allem war es besonders bei den letzten grösseren Ladungsdauern nicht möglich, mit der folgenden Beobachtung immer

[1] Elektrotechn. Zeitschr. 1892, Heft 4 und 5.

[2] Zeitschr. für Elektrotechnik, Wien, 1895, Heft 12.

[3] Diese Sitzungsber. 102. Bd., II. a, 1893, S. 773.

so lange zu warten, bis die vorhergehende Ladung ganz verschwunden war, so dass sich leicht etwas aus einer Beobachtung in die folgende verschleppte. Sodann war die Rückstandsbildung beständigen kleinen Änderungen unterworfen, so dass von einer genauen Bestimmung, z. B. der zur Maximalladung nothwendigen Zeit keine Rede sein kann.

Condensator aus reinem Paraffin 0·473 MF.

Ladung mit 1 Accum. = 2·1 Volt durch einen Widerstand $R = 10\,\Omega$. t Ladungsdauer in Secunden. α Ausschlag.

t	α	t	α
0·00004	71	0·00015	72·5
0·00005	73·3	0·00018	73
0·000066	72·5	0·5	74
0·00008	72	1	73
0·00012	72·5	15	74

Ob hier überhaupt eine Abhängigkeit der Capacität von der Ladungsdauer vorhanden, ist nicht mit Sicherheit anzugeben. Vermuthlich sind die Zuleitungsdrähte doch nicht ohne alle Selbstinduction, so dass die Zahl 73·3 bei 0·00005 Secunden Ladungsdauer das Maximum einer schwachen Oscillation ist. Jedenfalls ist dann die Rückstandsbildung für 15 Secunden unter 2%.

Bekanntlich geschieht die Ladung eines rückstandsfreien Condensators nach der Formel

$$Q = V_0 C(1 - e^{\frac{t}{CR}})$$

Ist $e^{-\frac{t}{CR}} = 10^{-3}$, so ist die Ladung praktisch als vollendet anzusehen. Alsdann ist

$$t = 3CR \log \text{nat}\, 10.$$

In unserem Falle ist

$$C = 0{\cdot}473 . 10^{-15} \text{ abs. E.}$$
$$R = 10^{10} \text{ abs. E.}$$
$$3 \log \text{nat}\, 10 \text{ nahezu} = 7$$

Daraus folgt

$$t = 0\cdot000033 \text{ Secunden.}$$

Wurde der Condensator mit 4 Accum. = 8·5 Volt geladen, so war die Ladung nach derselben Zeit beendigt.

Entladung desselben Condensators, geladen 1 Secunde zu 2·1 Volt.

α bezeichnet den Ladungsrest, der nach einer Entladung von t Secunden, durch 10 Ω Widerstand, noch im Condensator vorhanden war.

t	α
0·0	73
0·000017	18
0·000033	3·5
0·00005	0
	0

Die Entladung ist also in derselben Zeit beendigt wie die Ladung.[1] Um zu prüfen, ob nicht bei längerer Ladungsdauer doch zur Entladung eine längere Zeit erforderlich sei, wurde jetzt die Ladungsdauer nacheinander zu 5, 10, 30 Secunden genommen, aber nie konnte nach 0·00005 Secunden Entladung noch ein Ausschlag wahrgenommen werden.

Solch' vorzügliche Eigenschaften hatte der Condensator jedoch nur, wenn er eben aus dem Trockenraum kam; war er einige Zeit gegen Feuchtigkeit nicht geschützt, so zeigte er gleich die schon erwähnte Art von Rückstandsbildung, die zu der

---

Diese Beobachtungen stehen wohl nur scheinbar im Widerspruch mit denjenigen der Herren Prof. Kleiner (Wiedemann's Annalen, Bd. 50, S. 138) und Düggelin (Vierteljahrsschrift der naturforsch. Gesellsch., Zürich, 1895, Heft 2), die für Condensatoren aus reinem Paraffin nicht unter 0·5 Secunden fanden, obwohl die Capacität sehr klein war im Vergleich zu diesem Condensator. Denn einmal haben die Herren offenbar keinen Apparat gebraucht, um die kleinen Zeiten genau zu bestimmen, dann aber dürften die gebrauchten Wasserelemente bis 400 Stück hintereinander geschaltet, einen so grossen inneren Widerstand und so starke Polarisation besitzen, dass diese Verzögerung der Ladung hauptsächlich der Ladungsbatterie zuzuschreiben ist.

freien Ladung der Belege noch hinzukam und in 20 Secunden schon 23% der früheren Ladung betrug. Folgende Zahlen geben die beobachteten Ausschläge für den trockenen und feuchten Condensator nach *t* Secunden Ladungsdauer:

t	0·00005	0·0005	0·5	1	5	10	20
Trocken . . .	73·3	73	74	—	73	74	—
Feucht . .	73·5	75	77	78·7	85·5	89	90·2

Glimmercondensator 1 MF.

Für denselben rechnet sich die Ladungsdauer bei 10 Ω zu 0·00007 Secunden. Beobachtet wurde:

t	α	*t*	α
0·000066	156·5	0·000210	155·7
0·000100	157	1	156·9
0·00013	157·2	10	157
0·00018	155·7	30	156·5

Auch hier stimmt die beobachtete Ladungsdauer hinreichend mit der berechneten. Die etwas grossen Zahlen gleich zu Anfang deuten auch hier auf eine schwache Selbstinduction der Zuleitungsdrähte hin.

Wurde der Condensator zu 2·1 Volt geladen und wie die früheren entladen, so war ebenfalls nach 0·0001 Secunden keine Spur der Ladung mehr zu bemerken.

Die Resultate der Rückstandsbeobachtungen sind in Tafel I übersichtlich dargestellt. Die Zeit umfasst in Fig. 3 die 30 ersten Secunden, während welcher Paraff. Pap. C. I gerade vollständig geladen ist. Um die verschiedenen Condensatoren unmittelbar vergleichbar zu machen, sind die aufgenommenen Ladungsmengen in Procenten der Maximalladungen aufgetragen. Die Dimensionen dieser Figur lassen jedoch den Vorgang für die ersten sehr kleinen Zeiten nicht erkennen. Deshalb wurden in Fig. 4 die Curven in der Weise wiederholt, dass die Ordinaten in demselben Massstabe, die Abscissen in einem 18000mal grösseren aufgetragen wurden. Im Ganzen stellt Fig. 4 das erste 30.000. Streifchen von Fig. 3 dar. In derselben Weise ist der Vorgang der Entladung in Fig. 5 und 6 dargestellt.

IV. Die Oscillationen.

1. Für die Entladung eines Condensators von der Capacität C durch einen Schliessungskreis mit dem Widerstand R und der Selbstinduction S haben Kirchhoff und Lord Kelvin die Differentialgleichung hergeleitet:

$$\frac{d^2 \underset{\sim}{Q}}{dt^2} + \frac{R}{S} \frac{d\underset{\sim}{Q}}{dt} + \frac{\underset{\sim}{Q}}{CS} = 0. \qquad 1)$$

Dazu kommen in unserem Falle für $t = 0$ noch die Anfangsbedingungen[1]

$$\underset{\sim}{Q} = \underset{\sim}{Q}_0 \quad \text{und} \quad \frac{d\underset{\sim}{Q}}{dt} = -\frac{\underset{\sim}{Q}_0}{CR}$$

wo $\underset{\sim}{Q}_0$ die zur Zeit $t = 0$ im Condensator vorhandene Elektricitätsmenge bedeutet.

Daraus ergibt sich für den Fall einer oscillatorischen Entladung die Auflösung

$$\underset{\sim}{Q} = \underset{\sim}{Q}_0 e^{-\frac{\lambda t}{T}} \left[\cos \frac{\pi t}{T} + \frac{1}{\pi}\left(\lambda - \frac{T}{CR}\right) \sin \frac{\pi t}{T}\right]. \qquad 2)$$

Dabei bedeutet T die Schwingungsdauer, und es ist

$$T = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{CS} - \frac{R^2}{4S^2}}}. \qquad 3)$$

λ ist das logarithmische Decrement $= \frac{RT}{2S}$. 4)

In unserem Falle ist das zweite Glied im Ausdruck für T sehr klein und deshalb einfach zu setzen

$$T = \pi \sqrt{CS}, \qquad 5)$$

alsdann ist auch

$$\lambda = \frac{RT}{2S} = \frac{\pi^2}{2} \frac{RC}{T}. \qquad 6)$$

In dieser letzteren Form kann man aus der Gleichung 6 λ berechnen, ohne dass man den Selbstinductionscoëfficienten

[1] Hiecke, l. c. Vergl. auch Klemenčič, über den Energieverbrauch bei der Magnetisirung. Diese Sitzungsber., Bd. 104, 1895, S. 728.

zu kennen braucht, wenn man nur weiss, welche Capacität der Condensator während der Schwingungen hat.

Zur Beobachtung dieser oscillatorischen Entladung hat man nur die Rolle R (Fig. 2) auf Selbstinduction zu schalten, alsdann geben die im Galvanometer beobachteten Ladungsreste ein genaues Bild von der im Augenblick des Öffnens von a_2 vorhandenen Schwingungsphase, und indem man das bewegliche Contacthebelchen allmälig verschiebt, kann man die Schwingungsdauer und Dämpfung aus einer grösseren Zahl aufeinanderfolgender Schwingungen sehr genau bestimmen.

Beispielsweise seien hier die Schwingungen von drei Condensatoren mitgetheilt, die alle bei einer Ladungsdauer von 0·5 Secunden annähernd dieselbe Capacität = 1 MF. besassen. Alle drei wurden mit einer Abzweigung eines Accumulators zu 0·08 Volt geladen; der Widerstand des Oscillationskreises war 10·9 Ω, die Selbstinduction 244·5 *km*. Nach der Theorie hätten also drei congruente Curven sich ergeben müssen. Die Beobachtung ergab folgende Zahlen, die in Fig. 7 (Taf. II) nach einem gemeinschaftlichen Massstab eingetragen sind. Es wurden von je einer halben Welle meist 12 Punkte bestimmt; jeder Punkt ergab sich als Mittel aus zwei Beobachtungen bei commutirter Anfangsladung. Die Tabelle V enthält nur die Hauptpunkte, die Maxima und die Nullpunkte. Die Empfindlichkeit des Galvanometers ist so, dass 1 MF. zu 1 Volt geladen 65 Scalentheile Ausschlag gibt.

Tabelle V.

Glimmer-Cond.		Paraff. Pap. Cond. I		Paraff. Pap. Cond. II	
Trommelstellung	Ausschlag	Trommelstellung	Ausschlag	Trommelstellung	Ausschlag
11·60	+ 5·5	11·60	+ 5·5	11·60	4·5
11·76	0·0	11·76	0·0	12·00	0·0
13·25	—75·0	13·25	—73·3	12·86	—46·0
14·80	0·0	14·69	0·0	13·80	0·0
16·25	+67·0	16·15	+65·0	14·80	+44·8
17·80	0·0	17·60	0·0	15·80	0·0
19·25	—59·3	19·05	—56·5	16·65	—36·5
20·75	0·0	20·56	0·0	17·65	0·0
22·10	+52·8	22·00	+50·8	18·50	+36·5
23·70	0·0	23·45	0·0	19·55	0·0

Die Rechnung ergab für alle drei Condensatoren: Die Schwingungsdauer $T = 0 \cdot 0004913$ Secunden. Das log. Decrement $\lambda_{\text{Brigg}} = 0 \cdot 0475$ oder das Dämpfungsverhältniss $k = 10^{\lambda} = 1 \cdot 116$.

Für den Glimmercondensator gab die Beobachtung $T = 0 \cdot 0004915$.[1] Die Dämpfung war $k = 1 \cdot 125$, $\lambda_{\text{Brigg}} = 0 \cdot 0512$.

Wie man sieht, stimmt die berechnete Schwingungsdauer sehr gut mit der beobachteten überein,[2] die Dämpfung dagegen nicht. Doch ist die Abweichung so gering, dass man sie in der Figur kaum ausdrücken könnte. Es wurde deshalb die ideale Curve nicht gezeichnet und mag Curve I selber für die ideale gelten.

Weniger gut ist die Übereinstimmung bei den Rückstand bildenden Condensatoren. Was zunächst die Schwingungsdauer betrifft, so erscheint dieselbe kleiner, als der Capacität für statische Ladung entspricht. Es ergab sich für den Paraff. Pap. Cond. I $T = 0 \cdot 0004817$, für Paraff. Pap. Cond. II ist $T = 0 \cdot 0003025$.

Rechnet man aus dieser Schwingungsdauer die Capacität nach der Formel $T = \pi \sqrt{SC}$, so ergibt sich für den ersten Condensator $C = 0 \cdot 96$ MF., während die Maximalladung zur Zeit dieser Beobachtung $1 \cdot 20$ MF. anzeigte. Der Condensator folgte also den Schwingungen mit nur 80% seiner vollen Capacität.

Vergleicht man das mit der früheren Beobachtung über die Dauer der Ladung und Entladung (Tabelle I), so findet man für die Maximalladung einen Ausschlag von 195 Scalentheilen, in $0 \cdot 0002$ Secunden aber (der Dauer einer Viertelschwingung) lud sich der Condensator nur zu $156 \cdot 5$ Scalentheilen, d. i. zu $80 \cdot 2\%$ der Maximalladung.

Für den Paraff. Pap. Cond. II. ergibt sich aus der Schwingungsdauer $C = 0 \cdot 38$ MF., während bei voller Ladung $C = 1 \cdot 9$ MF

---

[1] Der Zeitwerth einer Trommelumdrehung ist hier $0 \cdot 0001644$ zu nehmen. Die Aufstellung des Apparates war nämlich eine etwas andere.

[2] Da die Schwingungsdauer immer sehr gut übereinstimmt, so kann man den Fallapparat auch ähnlich wie den v. Helmholtz'schen Pendelunterbrecher zur Bestimmung des Selbstinductionscoëfficienten des Schliessungskreises benützen, vorausgesetzt, dass man die Capacität des Condensators und die Zeitconstante des Fallapparates kenne. Cf. Gleichung 5).

war, so dass nur 20% an der Schwingung theilnahmen. Die Beobachtung mit statischer Ladung ergab den Maximalausschlag 618 (Tabelle III), für $T = 0\cdot00015$ Secunden dagegen 126, d. i. 20·5%.

Somit findet die scheinbare Verminderung der Capacität bei Wechselstrom in der Art und Weise, wie der Rückstand sich bildet und entladet, ihre naheliegende und natürliche Erklärung.

Wenn also J. Sahulka,[1] nachdem er nur Condensatoren aus Paraffinpapier untersucht, als Resultat seiner Untersuchung hinstellt, dass die Condensatoren mit festem Dielektricum ohne Ausnahme im Wechselstrom eine Verminderung der Capacität erfahren und nur Luftcondensatoren davon ausgenommen sind, so wäre es nach meinen Untersuchungen richtiger, zu sagen, dass rückstandsfreie Condensatoren überhaupt[2] eine constante Capacität besitzen, während Rückstandsbildner auch im Wechselstrom dieselbe Ladungsmenge aufnehmen, wie sie bei Gleichstrom in derselben Zeit aufnehmen würden.

2. In den oben mitgetheilten Beobachtungen dauerte die Ladung bis zum Beginne der Oscillation circa 1 Secunde. Diese Zeit reicht hin, um einen bedeutenden Rückstand zu bilden, der also, da er an der Schwingung nicht mit theilnimmt, während derselben im Condensator sitzt. Es wurde nun zunächst die Frage untersucht, ob derselbe nicht eine deformirende Wirkung auf die Schwingungen ausübte. Und es ergab sich, dass die Curven auch bei dem zweiten starken Rückstand bildenden Condensator dennoch regelmässig gedämpfte Sinusschwingungen blieben und dass die Welle mit der Rückstandsladung sich einfach superponirte. Dadurch erscheinen dann die der Anfangsladung entgegengesetzten 1, 3, 5. Maxima zu klein, während die 2, 4, 6. Maxima vergrössert werden. Diese scheinbare Verschiebung der Nulllinie zeigt sich umso deutlicher, je kleiner die Schwingungsamplitude im Verhältniss zur Rückstandsladung ist. So war in einem speciellen Falle

---

[1] L. c.

[2] Auch beim Condensator aus reinem Paraffin ergab sich vollkommene Übereinstimmung. Bei statischer Ladung war gefunden worden $C = 0\cdot473$ MF aus der Schwingungsdauer ergab sich $C = 0\cdot4733$ MF.

das 81. Maximum durch den Ausschlag Null charakterisirt. Von da an war die Amplitude kleiner als der Rückstand, und die folgenden Schwingungen verliefen durchaus an derselben Seite der Ruhelage. Es konnten noch etwa 20 Wellen beobachtet werden, dann ging die Entladung in die gewöhnliche gleichmässige Rückstandsentladung über. Fig. 8 zeigt diese Superposition, jedoch mit übertriebener Dämpfung $k = 1 \cdot 5$.

Wollte man bei diesen Condensatoren aus den beobachteten Maximis unmittelbar das Dämpfungsverhältniss bestimmen, so würde man sehr ungleiche Werthe erhalten. Man muss die Maxima von der Nulllinie der Oscillationen aus rechnen und deshalb zu den beobachteten Werthen eine solche Zahl x addiren (respective beim 2., 4.... Maximum subtrahiren), dass die Dämpfung constant wird, also

$$\frac{m_1 + x}{m_2 - x} = \frac{m_2 - x}{m_3 + x},$$

wenn $m_1 m_2 m_3$ drei beliebige aufeinanderfolgende Maxima sind. Das x ist jedoch nicht durchaus constant, sondern nimmt langsam ab, in dem Masse, als der Rückstand während der Oscillationen sich mit entladet.

V. Die Energieverluste bei den Oscillationen.

Sind V_1 und V_2 die Potentiale zweier aufeinanderfolgender Maxima; $\frac{1}{2} C V_1^2$ und $\frac{1}{2} C V_2^2$ die zugehörigen Energiemengen, so ist

$$W = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} C V_1^2 \left(1 - \frac{V_2^2}{V_1^2}\right) \tag{7}$$

der Energieverbrauch für eine Schwingung. Es ist nun $\frac{V_1}{V_2} = k$, wenn k das berechnete Dämpfungsverhältniss ist. Folglich ist der berechnete Energieverbrauch

$$W = \frac{1}{2} C V_1^2 \left(1 - \frac{1}{k^2}\right). \tag{8}$$

$1 - \frac{1}{k^2}$ bezeichnet jenen Bruchtheil der Gesammtenergie, welcher während einer Schwingung verbraucht wird.

Nun ergibt aber die Beobachtung im Allgemeinen ein Dämpfungsverhältniss k_1, welches grösser ist als das berechnete, und dementsprechend den grösseren Energieverbrauch

$$W_1 = \frac{1}{2} CV_1^2 \left(1 - \frac{1}{k_1^2}\right).$$

Daraus folgt dann ein Energieverlust

$$W_1 - W = \frac{1}{2} CV_1^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k_1^2}\right) \tag{9}$$

für eine Schwingung.

Die Frage nach der Ursache dieses Verlustes ist in der verschiedensten Weise beantwortet worden, ohne dass es jedoch geglückt wäre, einen durchschlagenden Beweis für eine bestimmte Ansicht zu bringen.

Eine Quelle von Verlusten ist nun immer die mangelhafte Isolation, ja es tauchte sogar die Meinung auf, als sei dies, wenn nicht die einzige, so doch die Hauptursache. Obwohl nun Herr Dr. Benischke, dem diese Annahme mit Rücksicht auf einen Aufsatz [1] gewöhnlich zugeschrieben wird, seine frühere Ansicht schon hat fallen lassen,[2] so hält doch Herr Düggelin[3] die Sache noch nicht für endgiltig erledigt und glaubt, dass man absolute Messungen abwarten müsse. Da ich nun in der Lage bin, solche vorlegen zu können, so will ich auf diesen Punkt etwas näher eingehen.

Ist der Isolationswiderstand R, das Anfangspotential V, so ist der Energieverlust für die ungedämpfte Schwingung bekanntlich

$$W = \left(\frac{V}{\sqrt{2}}\right)^2 \frac{T}{R}.$$

Dadurch werde das Potential von V auf V' herabgedrückt, und es ist

$$W = \frac{V^2 T}{2R} = \frac{1}{2} C(V^2 - V'^2) = \frac{1}{2} CV^2 \left(1 - \frac{V'^2}{V^2}\right),$$

G. Benischke, Zur Frage der Wärmetönung durch dielektrische Polarisation. Diese Sitzungsber., CII, II. a. 1893, S. 1345.

Cf. Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1895, Heft 16.

L. c.

folglich

$$\frac{T}{CR} = 1 - \frac{V'^2}{V^2}.$$

Setzen wir $\frac{V}{V'} = \varkappa$, so folgt

$$\varkappa = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{T}{CR}}} = 1 + \frac{T}{2CR},$$

da das zweite Glied sehr klein ist.

Sind die Schwingungen wie im vorliegenden Fall gedämpft, so ist der wahre Werth von $\varkappa$ noch etwas kleiner.

Für Paraff. Pap. Cond. I war $T = 0{\cdot}0005$ Secunden. $C = 10^{-15}$ abs. E. R im ungünstigsten Falle $= 1600 \cdot 10^6\, \Omega = 16 \cdot 10^{17}$ abs. E., woraus dann folgen würde $\varkappa = 1 \cdot 00000015$, d. h. das Potential sinkt während einer Schwingung um 0·000015 Procent.

Bei Paraff. Pap. Cond. II war $T = 0 \cdot 0003$, R wenigstens $= 4 \cdot 10^{15}$ abs. E., C bei dieser Schwingungsdauer circa $2 \cdot 10^{-16}$ abs. E., folglich $\varkappa = 1 \cdot 0004$, was ein Sinken des Potentials um $0 \cdot 04\,\%$ bedeuten würde, d. h. eine Grösse, die schon weit unterhalb der Grössenordnung der Beobachtungsfehler liegt. Die Verluste jedoch, um die es sich hier handelt, sind deutlich wahrnehmbar und betragen gerade bei diesem Cond. II bis zu $10\,\%$ für eine Schwingung. Sie übertreffen also die aus dem Leitungsvermögen berechneten mehr als hundertmal.

Auch ist wohl hinreichend bewiesen durch die Arbeiten von Steinmetz, Eisler und Düggelin, dass bei Verwendung von Gleichstrom ein solcher Mehrverlust nicht stattfindet.

Indem man also die Ursache dieser Verluste wohl mit Recht in dem Ladungswechsel suchte, glaubten manche Physiker zur Erklärung derselben eine eigene Hypothese von der »dielektrischen Hysteresis« aufstellen zu sollen. Es ist jedoch in dem schnellen Ladungswechsel vorerst noch eine andere Quelle für Energieverluste gelegen, sobald der Condensator einen Rückstand bildet. Eine einfache Überlegung, die weiter keiner Voraussetzung bedarf, als dass die Rückstandsbildung wirklich so vor sich gehe, wie es oben beobachtet worden ist, wird uns davon überzeugen. Angenommen der Condensator werde positiv geladen. Eine Ladungsdauer von 0·5, respective 1 Secunde reicht hin, um bei den Condensatoren aus Paraffinpapier einen Rückstand entstehen zu lassen. Beim Beginn der Oscillation fliesst zunächst die Ladung der Belege ab und vom Rückstande so viel, als in dieser Zeit eben abfliessen kann. Wenn nun gleich darauf die Belege negativ geladen sind, so wird die Entladung des Rückstandes bei der grösseren Potentialdifferenz umso mehr fortdauern. Die nothwendige Folge ist, dass dieser Theil des positiven Rückstandes einen gleich grossen der negativen Welle neutralisirt, wobei dann die entsprechende elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird. Dass die Rückstandsentladung einen Energieverlust nach sich zieht, ist leicht einzusehen, ob er hinreicht, um in allen Fällen den Mehrverlust zu erklären, das bedarf der näheren Untersuchung. Der einfachste und vollkommenste Beweis läge offenbar darin, dass man den Rückstandsverlust berechnete und untersuchte, ob er quantitativ mit dem beobachteten übereinstimmte. Allein das erlaubt der gegenwärtige Stand der Untersuchungen noch nicht. Doch glaube ich einige Folgerungen, die sich aus der obigen Erklärung ziehen lassen, bestätigt gefunden zu haben.

1. Ist der Mehrverlust im Wechselstrom wirklich nur eine Folge der Entladung und Neubildung des Rückstandes, so darf bei einem rückstandsfreien Condensator kein solcher Energieverlust sich zeigen. Zunächst stimmt mit dieser Folgerung überein, dass Benischke[1] für reines Paraffin und Kleiner[2] und Düggelin[3] für Paraffin und Colophonium keine Erwärmung constatiren konnten. Die Versuche mit dem Glimmercondensator gaben nun anfangs kein befriedigendes Resultat. In dem oben (Tab. V) mitgetheilten Falle z. B. war das Potential des ersten Maximums 1·154 Volt und die Energie 6·65 Erg. Für das zweite Maximum ergab die Berechnung: 1·038 Volt mit 5·36 Erg., also eine Verminderung um 1·29 Erg.

---

[1] L. c.
[2] L. c.
[3] L. c.

Die Beobachtung zeigte nur noch 1·029 Volt mit 5 25 Erg., also den Energieverbrauch 1·40 Erg., mithin einen Mehrverlust von 0·11 Erg., d. i. 1·65% der anfangs vorhandenen Energie.

Da mir diese Beobachtung von grosser Wichtigkeit zu sein schien, so wurde sie unter verschiedenen Variationen oft wiederholt. Eine Versuchsreihe z. B. wurde dreimal angestellt, wobei jedes Maximum mehrmals beobachtet wurde. Es ergab sich nur ein Beweis für die Genauigkeit der Methode. Die Dämpfungsverhältnisse waren nämlich 1·093, 1·093, 1·094. Somit blieb nur noch die eine Möglichkeit, dass dieser Verlust gar nicht im Condensator, sondern in den Rollen stattfand. Die zwei Rollenwindungen wurden voneinander isolirt und wie die zwei Belege eines Condensators behandelt. Zuerst wurde nach der gewöhnlichen Methode mit dem ballistischen Galvanometer die Capacität bestimmt und bei einer Ladungsdauer von 0·5 Secunden 0·3 Mikrofarad, bei 1 Secunde 0·41 MF. gefunden. Sodann handelte es sich darum, ob diese Ladung frei beweglich oder Rückstandsladung war. Die Rolle wurde 1 Secunde geladen, dann t Secunden durch einen Widerstand von 17·29 Ω entladen und dann der Rest im Galvanometer bestimmt. Es wurde gefunden:

Für $t =$.	0·0	0·0005	0·001	0·002	1	5	10
Der Ladungsrest	60·6	57·2	55·7	54·1	11	3·3	1·6

Aus diesen Zahlen geht deutlich hervor, dass die ganze Ladung eine Art Rückstand[1] war. Es musste daher die bisherige Schaltung, bei welcher Windungen mit grosser Potentialdifferenz unmittelbar nebeneinander lagen, aufgegeben werden. Die zwei Wickelungen wurden nun parallel geschaltet, was noch den Vortheil brachte, dass der Widerstand auf den vierten Theil seines früheren Werthes sank. Da aber auch die Selbstinduction um denselben Betrag abnahm, so wurden die zwei Rollen L und M in dieser Weise hintereinander geschaltet.

---

[1] Es konnte deshalb diese Ladung auch nicht an den Oscillationen theilnehmen, da der Theil, welcher während der kurzen Zeit zur Entladung gekommen, verschwindend klein geworden wäre, besonders wenn man bedenkt, dass die Capacität bei der Schaltung auf Selbstinduction doch keine so extrem grosse ist.

Jetzt lagen nur Windungen mit sehr nahe gleichem Potential nebeneinander.

Der Gesammtwiderstand des Oscillationsweges war jetzt $6 \cdot 23\ \Omega$, die Schwingungsdauer $T = 0 \cdot 000350$ Secunden, die Capacität 1 MF. Daraus rechnet sich nach Gleichung 6)

$$\lambda_{\mathrm{Brigg}} = 0 \cdot 03815 \qquad k = 1 \cdot 0920.$$

Das erste Maximum hatte $0 \cdot 84$ Volt mit $3 \cdot 53$ Erg. Der Energieverbrauch für die erste Schwingung war $0 \cdot 570$ Erg.

Die Beobachtung ergab $k = 1 \cdot 0926$, $\lambda_{\mathrm{Brigg}} = 0 \cdot 03846$, der Energieverbrauch für die erste Schwingung $0 \cdot 573$ Erg.

Eine solche Übereinstimmung beweist natürlich, dass weder in den Rollen, noch im Condensator ein Energieverlust stattfand und namentlich zeigt sie, dass auch der Wechsel der elektrischen Ladung an sich noch keinen Energieverlust verursacht.

Ein ähnliches Resultat hätte auch der Condensator aus reinem Paraffin geben sollen. Allein wegen des schon oben erwähnten Umstandes, dass der Condensator, sobald er längere Zeit an der freien Luft sich befand, eine Art Rückstandsbildung zeigte, stellten sich immer kleine Verluste ein.

Bei der Schwingungsdauer $T = 0 \cdot 000272$ Secunden, Potential des ersten Maximums $2 \cdot 67$ Volt, Widerstand in den Rollen $7 \cdot 44\ \Omega$, zeigte

$$\text{die Beobachtung } \lambda_{\mathrm{Brigg}} = 0 \cdot 03020 \qquad k = 1 \cdot 0720$$
$$\text{die Berechnung } \lambda_{\mathrm{Brigg}} = 0 \cdot 02805 \qquad k = 1 \cdot 0667$$

Die Anfangsenergie war $16 \cdot 86$ Erg., der Verbrauch während der ersten Schwingung nach der Rechnung $2 \cdot 04$ Erg., nach der Beobachtung $2 \cdot 20$ Erg., mithin der Verlust $0 \cdot 16$ Erg., d. i. 1%.

Zuletzt wurden Condensator und Rollen wieder 5 Tage abgesperrt, nachdem die Einstellungen des Fallapparates für die Maxima genau fixirt waren, dann wurde auf das erste und gleich darauf auf das fünfte Maximum eingestellt, so dass die ganze Beobachtung in einigen Minuten beendigt war. Es ergaben sich die Mittelwerthe

$$m_1 = 83 \qquad m_5 = 64 \cdot 2,$$

folglich

$$k^4 = 1\cdot2930 \qquad k = 1\cdot066 \qquad \lambda_{\text{Brigg}} = 0\cdot0279.$$

Die Übereinstimmung ist also eine ausgezeichnete zu nennen. Leider fehlten Zeit und Mittel, um diese Bestimmung durch weitere Untersuchungen noch zuverlässiger zu machen.

2. Eine andere Folgerung aus der oben versuchten Erklärung des Arbeitsverlustes ist diese: Bei verschiedenen Condensatoren, die alle Rückstand bilden, müssen unter sonst gleichen Umständen die Quadratwurzeln aus den Verlusten sich verhalten wie die Rückstände.

Da mit der Capacität und Selbstinduction auch die Schwingungsdauer gegeben ist, so ist es sehr schwer, bei verschiedenen Condensatoren dieselbe Schwingungsdauer zu erhalten, besonders wenn auch noch alle übrigen Apparate dieselben sein sollen. Ich musste mich deshalb mit einer angenäherten Übereinstimmung begnügen, indem ich von Paraff. Pap. Cond. II so viel Capacität einschaltete, dass der Unterschied möglichst klein wurde. Es waren dazu 2 MF. erforderlich, genau jener Theil des Condensators, der oben auf seine Rückstandsbildung untersucht war.

Die Schwingungsdauer war dann $T = 0\cdot000448$,

die Dämpfung berechnet $k = 1\cdot116$, beobachtet $k_1 = 1\cdot156$, folglich war der Verlust

$$W_1 - W = \frac{1}{2}\, CV^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k_1^2}\right) = \frac{1}{2}\, CV^2 \times (0\cdot233)^2$$

Bei Paraff. Pap. Cond. I war $T = 0\cdot000486$, $k = 1\,122$, $k_1 = 1\cdot130$,

folglich der Verlust

$$W_1 - W = \frac{1}{2}\, CV^2 (0\cdot0424)^2.$$

Also verhalten sich die Verluste wie $(0\cdot233)^2$ $(0\cdot0424)^2$ und die Quadratwurzeln derselben wie $5\cdot5$ 1.

Nach Tabelle III nahm der Paraff. Pap. Cond. II in $0\cdot5$ Secunden (so lange dauerte bei den Oscillationen die Ladung) 280 Scalentheile Ladung auf, darunter 121 Scalentheile freie

Ladung, d. h. solche, die sich durch den Widerstand 10 Ω in der kurzen Zeit entladen konnte, und 159 Scalentheile Rückstand.

Paraff. Pap. Cond. I nahm 185 Scalentheile Gesammtladung auf mit 155 Scalentheilen auf den Belegen und 30 Scalentheilen Rückstand. Das Verhältniss der Rückstände ist also 159 30 = = 5·3 1.

Während bei den bisherigen Versuchen das Potential absichtlich so niedrig gehalten wurde, als es die Empfindlichkeit des Galvanometers nur erlaubte, erübrigt noch, die Abhängigkeit des Verlustes vom Ladungspotential zu untersuchen. Schreibt man Gleichung 9)

$$\frac{W_1 - W}{V^2} = \frac{1}{2} C \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k_1^2} \right),$$

so ist die linke Seite constant bei verschiedenen Werthen von V, falls der Verlust an Energie dem Quadrate des Potentials proportional ist. Alsdann muss auch rechts eine Constante stehen, d. h. es muss k_1, die beobachtete Dämpfung, constant sein. Nimmt dagegen der Verlust mit einer geringeren Potenz, z. B. der ersten, zu, so ist

$$\frac{W_1 - W}{V} = \frac{1}{2} C \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k_1^2} \right) V = \text{Const.}$$

Alsdann muss k_1 mit wachsendem V abnehmen.

Es versteht sich, dass namentlich bei den rückstandsbildenden Condensatoren nur solche Beobachtungen beweisen, die unmittelbar hintereinander gemacht wurden. Das Potential ist immer dasjenige des mittleren der fünf aufeinanderfolgenden Maxima, aus denen die Dämpfung bestimmt wurde.

Glimmercondensator, Rolle L, $T = 0.000492$ Secunden.

Potential	0·5	3	40	100	Volt
Dämpfung	1·1300	1·1310	1·1304	1·1300	

Paraff. Pap. Cond. I, Rolle L, $T = 0·000486$ Secunden.

Potential	0·5	40	100	Volt
Dämpfung	1·135	1·137	1·139	

folglich

$$k^4 = 1 \cdot 2930 \qquad k = 1 \cdot 066 \qquad \lambda_{\text{Brigg}} = 0 \cdot 0279.$$

Die Übereinstimmung ist also eine ausgezeichnete zu nennen. Leider fehlten Zeit und Mittel, um diese Bestimmung durch weitere Untersuchungen noch zuverlässiger zu machen.

2. Eine andere Folgerung aus der oben versuchten Erklärung des Arbeitsverlustes ist diese: Bei verschiedenen Condensatoren, die alle Rückstand bilden, müssen unter sonst gleichen Umständen die Quadratwurzeln aus den Verlusten sich verhalten wie die Rückstände.

Da mit der Capacität und Selbstinduction auch die Schwingungsdauer gegeben ist, so ist es sehr schwer, bei verschiedenen Condensatoren dieselbe Schwingungsdauer zu erhalten, besonders wenn auch noch alle übrigen Apparate dieselben sein sollen. Ich musste mich deshalb mit einer angenäherten Übereinstimmung begnügen, indem ich von Paraff. Pap. Cond. II so viel Capacität einschaltete, dass der Unterschied möglichst klein wurde. Es waren dazu 2 MF. erforderlich, genau jener Theil des Condensators, der oben auf seine Rückstandsbildung untersucht war.

Die Schwingungsdauer war dann $T = 0 \cdot 000448$,

die Dämpfung berechnet $k = 1 \cdot 116$, beobachtet $k_1 = 1 \cdot 156$, folglich war der Verlust

$$W_1 - W = \frac{1}{2} CV^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k_1^2} \right) = \frac{1}{2} CV^2 \times (0 \cdot 233)^2$$

Bei Paraff. Pap. Cond. I war $T = 0 \cdot 000486$, $k = 1 \cdot 122$, $k_1 = 1 \cdot 130$,

folglich der Verlust

$$W_1 - W = \frac{1}{2} CV^2 (0 \cdot 0424)^2.$$

Also verhalten sich die Verluste wie $(0 \cdot 233)^2$ $(0 \cdot 0424)^2$ und die Quadratwurzeln derselben wie $5 \cdot 5$ 1.

Nach Tabelle III nahm der Paraff. Pap. Cond. II in $0 \cdot 5$ Secunden (so lange dauerte bei den Oscillationen die Ladung) 280 Scalentheile Ladung auf, darunter 121 Scalentheile freie

Ladung, d. h. solche, die sich durch den Widerstand 10 Ω in der kurzen Zeit entladen konnte, und 159 Scalentheile Rückstand.

Paraff. Pap. Cond. I nahm 185 Scalentheile Gesammtladung auf mit 155 Scalentheilen auf den Belegen und 30 Scalentheilen Rückstand. Das Verhältniss der Rückstände ist also 159 30 = = 5·3 1.

Während bei den bisherigen Versuchen das Potential absichtlich so niedrig gehalten wurde, als es die Empfindlichkeit des Galvanometers nur erlaubte, erübrigt noch, die Abhängigkeit des Verlustes vom Ladungspotential zu untersuchen. Schreibt man Gleichung 9)

$$\frac{W_1-W}{V^2} = \frac{1}{2}\,C\left(\frac{1}{k^2}-\frac{1}{k_1^2}\right),$$

so ist die linke Seite constant bei verschiedenen Werthen von V, falls der Verlust an Energie dem Quadrate des Potentials proportional ist. Alsdann muss auch rechts eine Constante stehen, d. h. es muss k_1, die beobachtete Dämpfung, constant sein. Nimmt dagegen der Verlust mit einer geringeren Potenz, z. B. der ersten, zu, so ist

$$\frac{W_1-W}{V} = \frac{1}{2}\,C\left(\frac{1}{k^2}-\frac{1}{k_1^2}\right)V = \text{Const.}$$

Alsdann muss k_1 mit wachsendem V abnehmen.

Es versteht sich, dass namentlich bei den rückstandsbildenden Condensatoren nur solche Beobachtungen beweisen, die unmittelbar hintereinander gemacht wurden. Das Potential ist immer dasjenige des mittleren der fünf aufeinanderfolgenden Maxima, aus denen die Dämpfung bestimmt wurde.

Glimmercondensator, Rolle L, $T = 0.000492$ Secunden.

Potential	0·5	3	40	100	Volt
Dämpfung	1·1300	1·1310	1·1304	1·1300	

Paraff. Pap. Cond. I, Rolle L, $T = 0·000486$ Secunden.

Potential	0·5	40	100	Volt
Dämpfung	1·135	1·137	1 139	

Paraff. Pap. Cond. II, Rolle *L*.

Potential	0·1	25	60	Volt
Dämpfung	1·1250	1·1240	1·1245	

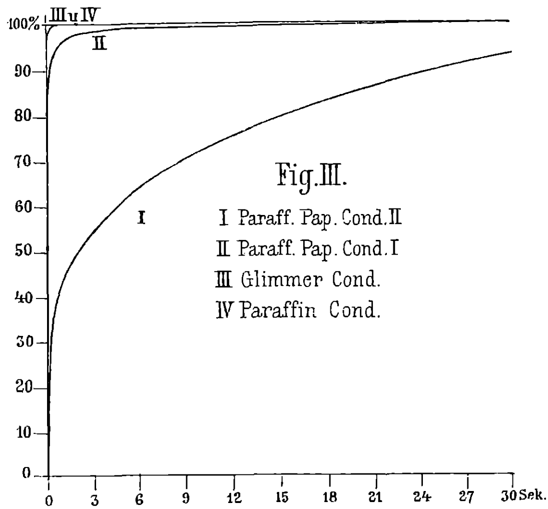
Es ist also k_1 constant, und die Verluste nehmen, wenigstens für den Bereich dieser Beobachtungen, mit dem Quadrate der Spannung zu, wie schon wiederholt constatirt wurde.

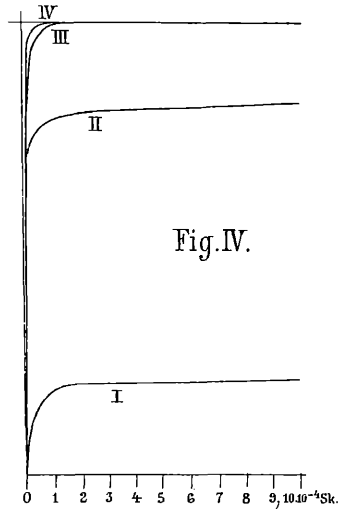
Mit geringen Abänderungen dürfte die oben versuchte Erklärung des Arbeitsverlustes sich auch auf eigentliche Wechselströme anwenden lassen.[1]

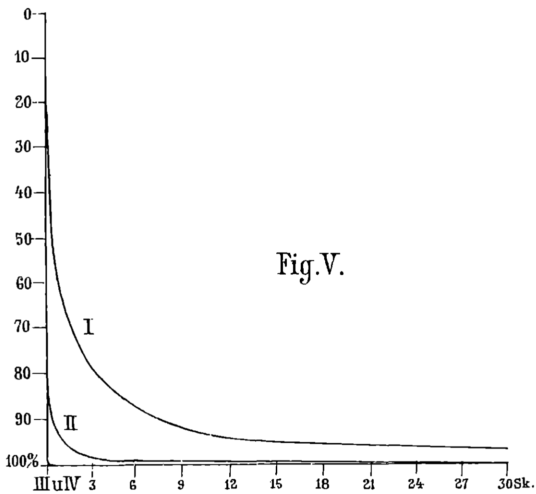
Zwar genügen die angeführten Beobachtungen durchaus nicht, um zu zeigen, dass der Mehrverlust an Energie bei Wechselströmen in allen Fällen eine Folge der Rückstandsbildung sei. Jedenfalls aber wird man zugeben, dass sich diese Erklärung aus den beobachteten Verhältnissen im Dielektricum ganz natürlich ergibt, während die Hypothese einer dielektrischen Hysteresis viel mehr in einem gewissen Vorurtheil, ein Analogon zu den interessanten Entdeckungen Warburg's finden zu müssen, als in einer genauen Beobachtung der Vorgänge im Dielektricum ihren Ursprung haben dürfte. Zum einwurfsfreien Nachweis einer dielektrischen Hysteresis wäre erforderlich, dass entweder dieser Mehrverlust im Wechselstrom auch bei einem rückstandsfreien Condensator constatirt würde, oder, wenn man schon Rückstandsbildner gebraucht, so müssten von den erhaltenen Verlusten neben allen anderen auch diejenigen vorher in Abzug gebracht werden, welche durch die Rückstandsbildung immer nothwendig sich ergeben müssen. Beweise der zweiten Art liegen begreiflicherweise bis jetzt nicht vor; die Beobachtungen an rückstandsfreien Condensatoren aber haben bisher gegen Energieverluste entschieden. Die Annahme einer dielektrischen Hysteresis ist also bis jetzt durch die Erfahrung nicht bestätigt worden.

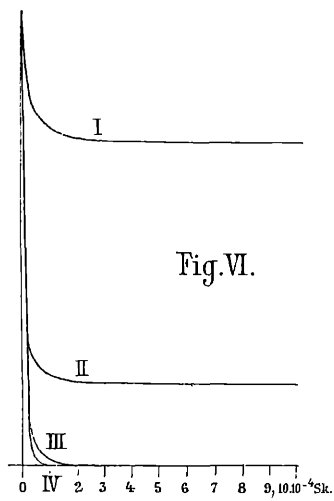
---

[1] Schon Herr Dr. Benischke führt in einem Aufsatz (Zeitschr. für Elektrotechnik, Wien 1895, Heft 16) den Arbeitsverlust auf die Rückstandsbildung zurück, doch ist seine Erklärung eine etwas andere als sie hier gegeben wurde.

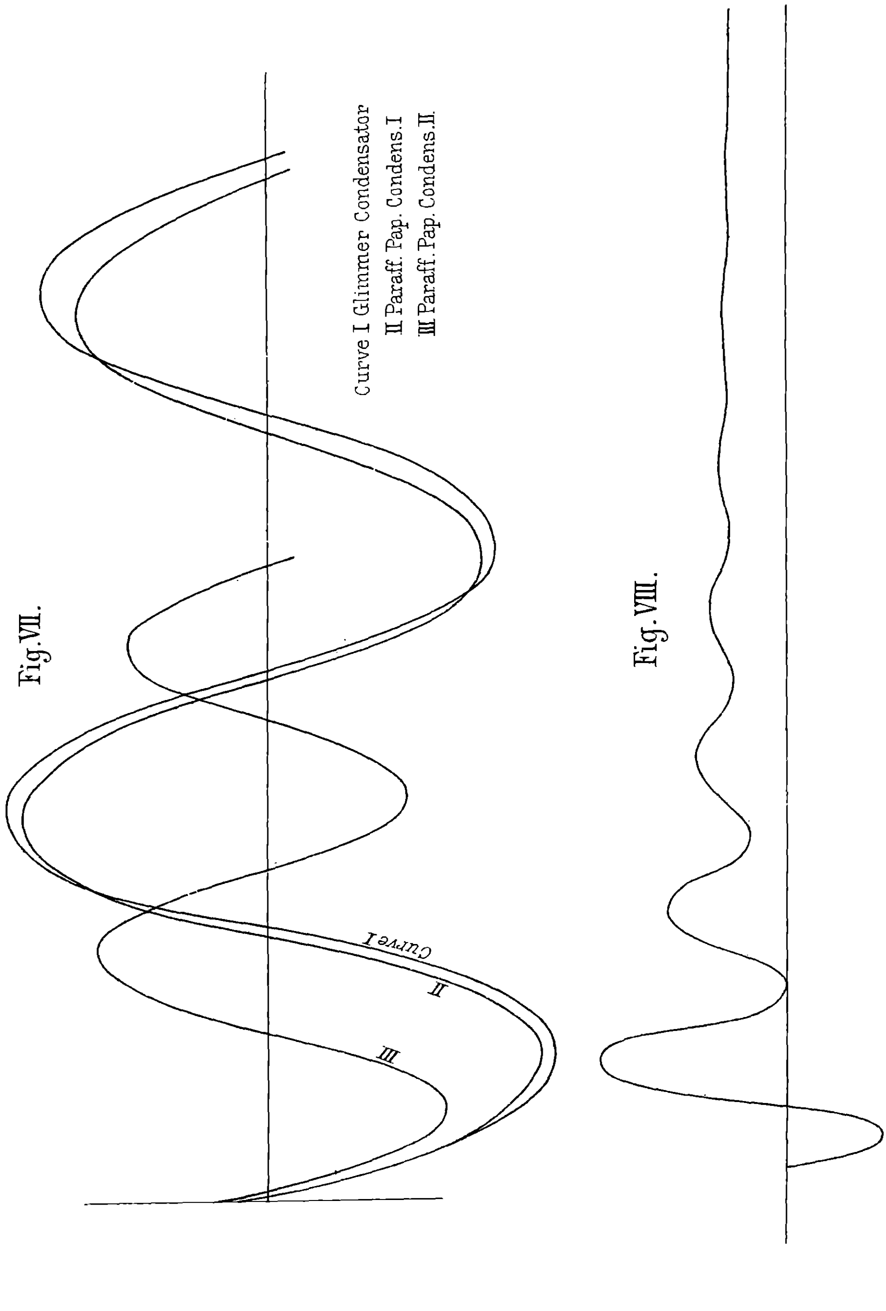








Autor del. Lith. Anst. v. Th. Bannwarth, Wien.
Sitzungsberichte d. kais. Akad. d. Wiss., math.-naturw. Classe, Bd. CV. Abth. IIa. 1896.



Autor del

Lith. Anst. v. Th. Bannwarth, Wien.