

# Beobachtungen über Erzeugung von Wärme durch dielektrische Polarisation.

Von

**R. Düggelein.**

Die ersten unsere Frage betreffenden Untersuchungen datieren vom Jahre 1864 und sind von W. Siemens<sup>1)</sup> an einer Leydner-Flasche ausgeführt worden, deren dielektrische Glaswand sich infolge abwechselnden elektrischen Ladens und Entladens erwärmte.

In enger Beziehung zur Frage stehen sodann einschlägige Beobachtungen von E. Duter<sup>2)</sup>, Govi<sup>3)</sup>, Righi<sup>4)</sup>, Kortweg<sup>5)</sup>, Quincke<sup>6)</sup>, Röntgen<sup>7)</sup>, Boltzmann<sup>8)</sup>, Oddone<sup>9)</sup>, welche Autoren indessen wesentlich das Phänomen der Elektrostriktion behandelten.

Erst spätere Untersuchungen von Naccari und Bellati<sup>10)</sup>, wie auch von J. Borgmann<sup>11)</sup> und Hans

<sup>1)</sup> W. Siemens: Monatsberichte der Berliner Acad. Okt. 1861.

<sup>2)</sup> E. Duter: C. R. LXXXVII p. 828—30, 960—61, 1036, 1878. C. R. 88. p. 1260—1262, 1879.

<sup>3)</sup> Govi: Nuov. Cim. XXI & XXII. v. J. 1866.

<sup>4)</sup> Righi: C. R. 88. p. 1262—65, 1879.

<sup>5)</sup> Kortweg: C. R. 88, p. 338—40, 1879.

<sup>6)</sup> Quincke: Wiedem.-Annalen, Bd. 10, 1880.

<sup>7)</sup> Röntgen: Wiedem.-Annalen, Bd. 11, p. 771, 1880.

<sup>8)</sup> Boltzmann: Wiener Sitz.-Ber. 1880, p. 826 II. 1882.

<sup>9)</sup> Oddone: R. C. R. Acc. dei Lincei 6. I. Sem. 1890.

<sup>10)</sup> Naccari & Bellati: Atti di Torino 17. 26. III. 82. 12 pp. Sep.

<sup>11)</sup> J. Borgmann: J. d. russ. phys. Ges. 18. p. 1—8; 86.

Fritz<sup>1)</sup> beziehen sich lediglich auf die Erscheinung, wonach durch abwechselnde elektrostatische Polarisirung Dielektrika sich erwärmen.

J. Borgmann hat im Besondern noch Versuche über den Einfluss der elektrischen Spannung auf die im Dielektrikum entwickelte Wärmemenge angestellt und gefunden, dass diese annähernd proportional dem Quadrate der Potentialdifferenz der Leiter-Belegungen sei.

Die Resultate der Untersuchungen von Dr. Hans Fritz sind zusammengefasst in den Satz:

«Bei abwechselnder Ladung und Entladung eines Kondensators mit ungleicher Ladung beider Belegungen wird in demselben eine bedeutende Wärmemenge erzeugt, welche jedenfalls nahezu proportional dem Quadrate der Potentialdifferenz ist.»<sup>2)</sup>

«Werden beide Belegungen gleich geladen, so findet keine Temperaturänderung statt.»

Auf Grund seiner eigenen Ermittlungen und älterer Untersuchungen sucht Fritz die Natur der untersuchten thermischen Effekte festzustellen und das Resultat seiner Ueberlegungen ist die Ansicht, dass es bei der elektrischen Polarisirung der Dielektrika eine Art Hysteresis giebt, wie sie für die Polarisirung paramagnetischer Substanzen zuerst von Warburg nachgewiesen ist, und dass die Existenz einer solchen Hysteresis die einzige zulässige Erklärung der diskutirten Wärmetönung abgiebt.

Die Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse bei gleichnamiger und entgegengesetzter Ladung von Kondens-

<sup>1)</sup> Hans Fritz: Inaugural-Dissert. Zürich 1893.

<sup>2)</sup> Anmerkung: Dies Versuchsergebnis bedeutet, dass die betreffende Wärme nahezu ein konstanter Bruchtheil der gesamten Ladungsenergie ist.

sator-Belegungen schliesst die Erklärung durch Erregung molecularer Oscillationen, welche die Wärmetönungen bedingen sollen, aus, und dass die untersuchten thermischen Wirkungen nicht Joule'sche Wärme sein können, ergeben die Grössenverhältnisse der bei den Fritz'schen Versuchen festgestellten Energiemengen. <sup>1)</sup>

Die Feststellung der Existenz dielektrischer Hysteresis ist auch der Zweck der Arbeiten von Steinmetz <sup>2)</sup> und Arnò <sup>3)</sup>.

Steinmetz bemerkt: «Dass in Dielektricus in einem elektrostatischen Wechselfelde Energie verbraucht wird, folgt aus der bekannten Erfahrung, dass ein Kondensator, angeschlossen an die Klemmen einer Wechselstrom-E. M. K. heiss wird, **selbst wenn der direkt durch den Kondensator als toten Widerstand hindurchfliessende Strom verschwindend klein ist.**»

Durch seine Versuche an einem Paraffinkondensator stellte er fest, dass die von einem dielektrischen Medium unter dem Einfluss eines wechselnden elektrostatischen Feldes verzehrte Energie  $H$  proportional sei dem Quadrate der Intensität  $E$  des elektrischen Feldes:

$$H = 7,62 E^2.$$

---

<sup>1)</sup> Anmerkung: Die Grössenordnung der bei Fritz aufgeführten Quotienten  $\frac{A}{B}$  (Verhältnis der Wärmetönung zur gesamten Ladungsenergie) ergibt, dass die Widerstände in Glas der von Fritz verwendeten Kondensatoren von gleicher Grössenordnung sein müssten mit dem einer in den Beobachtungen verwendeten Drahtspule von 30 Ohm Widerstand, wenn die in den Kondensatoren beobachtete Wärme Joule'sche Wärme sein könnte.

<sup>2)</sup> Steinmetz: Elektrotechnische Zeitschrift 1892, Heft 18, p. 227.

<sup>3)</sup> Arnò: R. C. della R. Acc. dei Lincei 1892 Oct., p. 284; April 1893, p. 341; Nov. 1893, p. 260.

Diese Gesetzmässigkeit unterscheidet sich von einer früheren von Steinmetz für den Energie-Verlust in Eisen unter dem Einfluss eines wechselnden magnetischen Feldes aufgefundenen insofern, als nach dieser letztern der Energie-Verlust eines unter besagtem Einflusse stehenden magnetisierbaren Körpers proportional zur 1,6ten Potenz der Intensität des Feldes wäre.

Auch würde jene Proportionalität nur bis zu einem Grenzwerthe stattfinden, «von wo ab die verzehrte Energie rascher zunimmt als das Quadrat der Spannung, indem wie es scheint, die Widerstandsfähigkeit des Dielektrikums nachzugeben beginnt».

Die Arbeiten Arnò's zeigen, dass bei dielektrischer Polarisation diejenigen Umstände thatsächlich vorhanden sind, welche Hysteresis bedingen, nämlich dass die inducierten elektrischen Momente nicht bloss Funktionen der inducierenden Kraft, sondern ausserdem der Zeit sind.

Ein unter dem Einfluss eines rotierenden elektrischen Feldes stehender Kaliglimmer-Cylinder zeigt das Bestreben, in der nämlichen Richtung zu rotieren, in welcher das elektrische Feld sich dreht, woraus sich ergibt, dass der dielektrische Cylinder an Energie verliert.

Diesen Energie-Verlust  $W$  hat Arnò zunächst für einen Ebonit-Cylinder berechnet und gefunden, dass er proportional sich erweise zur 1,6ten Potenz der Intensität  $F$  des Feldes:

$$W = \eta F^{1,6},$$

ein Ergebnis, welches identisch mit der Gesetzmässigkeit ist, welche Steinmetz für den Energie-Verlust in magnetisierbaren Körpern feststellte.

Für eine Reihe auf dieses ihr Verhalten geprüfter dielektrischer Cylinder verschiedener Substanz hat der

Herr Autor in einem weitem Beitrage die, verschiedenen Dielektrici, welche dieser Gesetzmässigkeit folgen, zugehörigen Proportionalitätskonstanten berechnet, welche alle in einer 14 Dielektrika zählenden Reihe zwischen 99 und 1388 liegen.

Vergleichende Angaben über den relativen Betrag dielektrischer Hysteresis auf Grund von Temperaturmessungen in verschiedenen, zu Kondensatoren verwendeten dielektrischen Substanzen, geben die Untersuchungen meines verehrten Lehrers, Herr Prof. Dr. A. Kleiner<sup>1)</sup>. Dieselben weisen sehr grosse Unterschiede auf im Betrag der durch Hysteresis in verschiedenen Substanzen unter gleichen Umständen zur Beobachtung kommenden Erwärmungen, und es ergiebt sich aus den Versuchen das quantitative Gesetz, dass:

1) Bei abwechselnder elektrischer Polarisation von Dielektrika, Erwärmung der dielektrischen Masse nicht notwendig eintritt.

2) Zufolge vorgenommenen Versuchen an verschieden dicken Glastafeln, sich die, in denselben auftretenden Wärmemengen innerhalb gewisser Grenzen nahe verhalten wie umgekehrt die Quadrate ihrer Dicken, was darauf hinauskommt, dass die durch Hysteresis producierte Wärme einen nahezu konstanten Bruchteil der gesamten Ladungsenergie ausmacht.

Der Herr Verfasser hält die Existenz dielektrischer Hysteresis für eine ausgemachte Sache, auf Grund seiner

---

<sup>1)</sup> A. Kleiner: Ueber die durch elektr. Polaris. in Isolatoren erzeugte Wärme. (Vierteljahrsschrift der naturforschenden Gesellsch. in Zürich, XXXVII, 3—4. Heft, 1893. Poggendorf-Annalen, Neue Folge Bd. 50, 1893.)

eigenen und der in seinen Laboratorien ausgeführten Untersuchungen von Dr. Hans Fritz.

Zu dem in den zuletzt aufgeführten Arbeiten vertretenen Standpunkt setzt sich in Gegensatz eine neueste Publikation von Herr G. Benischke <sup>1)</sup>, welche auf Grund von Messungen an Paraffin-Kondensatoren zum Schlusse kommt, die bei wechselnder dielektrischer Polarisirung in Dielektrici erscheinende Wärme sei nichts anderes als Joule'sche Stromeswärme, herrührend von der, wenn auch geringen Leitung in den, in Kondensatoren zur Verwendung kommenden sogenannten Isolatoren.

Auf Grund dieser Ansicht liesse sich die grosse Verschiedenheit im relativen Betrag der in den Versuchen erscheinenden Energiemengen leicht verstehen und es spricht für diese Ansicht auch der Umstand, dass die hier behandelte Wärmetönung um so beträchtlicher ausfällt, je schlechter die Isolationsfähigkeit der Substanzen ist.

Auf diese Ansicht, da sie sich in Widerspruch setzt mit eigenen und den oben angeführten Anschauungen und auf deren Kritik soll am Schlusse der Arbeit spezieller eingetreten werden.

Im Folgenden sollen die eben erwähnten Untersuchungen meines verehrten Lehrers zum Theil nach einer andern Richtung ausgedehnt werden, zum Theil eine Erweiterung erfahren, indem eine Reihe von Flüssigkeiten auf ihr Verhalten hinsichtlich Wärmetönung geprüft werden.

Auch werde ich nicht ermangeln, auf gewisse während der Versuche zum Vorschein kommende Begleiterschei-

---

<sup>1)</sup> G. Benischke: Zur Frage der Wärmetönung durch dielektrische Polarisirung. (Wiener Sitz.-Ber. 1893.)

nungen aufmerksam zu machen, wie nicht minder praktische, aus den gewonnenen Resultaten herzuleitende Nutzenwendungen zu würdigen.

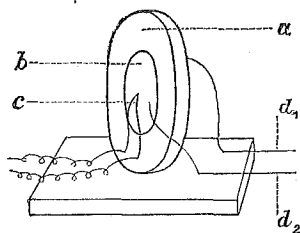
## A.

## Untersuchung fester Dielektrika.

## I. Versuchsmethode.

Das in der Folge verwendete Versuchsverfahren deckt sich für sämtliche im Abschnitte A einer Prüfung auf Wärmetönung unterzogenen Dielektrika mit dem von meinem verehrten Lehrer, Herr Prof. Dr. A. Kleiner zuerst eingeschlagenen und besteht dem Principe nach in der Feststellung der durch abwechselndes Laden und Entladen verschiedener Kondensatoren — bei Zufuhr stets gleicher Elektrizitätsmengen — in verschiedenen Dielektrics bewirkten Temperaturerhöhungen, auf thermo-elektrischem Wege. (Fig. I.)

Fig. I.



Meine Versuchsobjekte, eine Art Franklin'scher Täfelchen (Fig. I, a), bestanden zunächst aus planparallelen Platten verschiedener dielektrischer Substanzen, hatten  $1 \text{ dm}^2$  zur Fläche und variierten in der Dicke zwischen 0,5 und 4,0 mm.

Die leitenden Grenzbelege, kreisrunde, dünne Stanniolblätter (Fig. I, b) von 5 cm Durchmesser konnten nach einiger Ueberlegung und nach Erlangen etwelcher Uebung ohne jegliche Klebemittel, durch blosses Aufdrücken

und Anreiben bei allen Tafeln zum festen Adhärenzen gebracht werden.

Diese einfache Art auf dielektrischen Tafeln leitende Grenzbelege anzubringen, lässt sich wohl so erklären, dass in Folge Aufdrückens und fortwährenden Anreibens, die zwischen dielektrischer Tafel und Leiter-Belegung eingeschlossene Luft allmählich zum Entweichen gezwungen wird.

Durch Vermeidung jeglicher Klebemittel sind aber offenbar zweckentsprechende Verhältnisse erzielt worden, denn auch bei nur mässigem Gebrauche welcher, wäre die richtige Deutung erhaltener Resultate erheblich erschwert worden.

Die so beschaffene Kondensatorplatte musste mittelst Zuleitungsdrähten (Fig. I,  $d_1$ ,  $d_2$ ) mit der Elektrizitätsquelle in Verbindung gebracht werden können und zwar so, dass schlechter Kontakt zwischen Leiter-Belegen und Zuleitung ausgeschlossen blieb. Zu dem Behufe sind für alle Platten, deren Zuleitungsdrähte an den Stanniolbelegungen angelöthet worden und zwar unter Gebrauch Wood'schen Metalles als Loth, dessen Schmelzpunkt bei  $65 - 70^\circ \text{C}$  liegt und dessen Verwendung die Methode überhaupt ermöglichte. Löthen mit Zinn hätte ein Durchschmelzen der Belegungen wie auch Schmelzen oder Spalten der dielektrischen Schicht, je nach deren Schmelzpunkt und Sprödigkeit zur Folge gehabt.

Zum Nachweise der durch abwechselnde dielektrische Polarisirung bewirkten Erwärmung der Dielektrika bediente ich mich feiner, mittelst Silber gelötheter Thermo-Elemente, bestehend aus 4 cm. langen, 0,1 mm. dicken Kupfer- und Nickel-Drähtchen. Der Gebrauch von Silber zur Herstellung der beiden Löthstellen des Thermo-Ele-



mentes erlaubte es, diese letztern sehr fein zu gestalten und das Anlöthen einer derselben an eine Belegung mit dem Loth von niedrigem Schmelzpunkt bot so keine Schwierigkeiten.

\* In ähnlicher Weise wie zwischen Zuleitungsdrähten und den Leiterbelegungen konnte denn auch hier zwischen einer Leiter-Belegung und einer der feinen Löthstellen des Thermo-Elementes feste Verbindung hergestellt werden, wobei die Vorsicht beobachtet wurde, möglichst kleine Quantitäten Loth zu gebrauchen, um durch dasselbe keinen allzu erheblichen Wärmeentzug aus dem Dielektrikum befürchten zu müssen.

Die zweite Löthstelle wurde jeweilen an den unbelegten Rand angelegt, darauf etwas Siegellack gegossen, um sie so gegen den Einfluss allfälliger Luftströmungen und daraus resultierende Temperaturschwankungen geschützt zu wissen.

Bei Kolophonium und Paraffin wurden mannigfache Abänderungen in der Temperaturbestimmung durchprobiert. Vorläufige Versuche zeigten nämlich bald, dass ich es für diese Substanzen mit einer verschwindend kleinen Wärmemenge zu thun haben würde, was mich bewog, hier gewisse in Betracht fallende Faktoren, wie Ausstrahlung, Wärmeabgabe an das auf der Thermo-Elementenspitze ruhende Lothklümpchen etc. thunlichst zu eliminieren.

Dies suchte ich zunächst dadurch zu erreichen, dass ich das Thermo-Element zwischen zwei Platten mit einer gemeinschaftlichen innern und je einer äussern Belegung schmolz, wobei einige Sorgfalt darauf zu verwenden war, die beiden Thermo-Elementendrähtchen im Innern der Doppelplatte möglichst isoliert von einander zu halten.

Durch diese methodische Abänderung fallen Wärmeausstrahlung, Leitung und Wärmeabgabe an das Lothklümpchen vollständig dahin.

Indessen resultierte aus dieser Methode nicht, was ich mir von ihr versprach. Einmal bilden die beiden aufeinandergefügtten Platten kein homogenes Ganzes; winzige Löcher und Unebenheiten auf ihren Kontaktflächen, besonders aber ungenügende Isolation der Cu- und Ni-Drähtchen des Thermo-Elementes von einander, waren geeignet, mancherlei Störungen zu veranlassen und so kam es auch, dass sich alle nach diesem Verfahren ausgeführten Beobachtungen in launenhaftester Weise widersprachen.

Ich nahm Zuflucht zu einem dritten Verfahren, darin bestehend, dass ich das Thermo-Element beim Giessen einer möglichst dünnen Platte in Mitte derselben hineinschmolz. So wenigstens verfuhr ich bei Kolophonium. In Paraffin liess sich leicht eine feine Spalte ritzen, die nach vorangehendem Hineinsenken eines Thermo-Elementes mit einem der nämlichen Masse entnommenen heissen Gusse wieder zugefüllt wurde, worauf die betreffende Fläche eben abgeschnitten wurde.

Im Uebrigen gestaltete sich die Anfertigung dieser Kondensator tafeln wie im erstbeschriebenen Verfahren.

Die Methode der Beobachtung bestund nun darin, innert möglichst kurzer Frist eine nöthige Anzahl Ladungen und Entladungen des auf Wärmetönung zu untersuchenden Kondensators zu bewirken, um in demselben eine leicht beobachtbare thermische Wirkung hervorzurufen.

Um die in verschiedenen Kondensatoren auftretenden Wärmemengen unter sich vergleichbar machen zu können, bedurfte es der Reduktion der für sämtliche Versuchs-

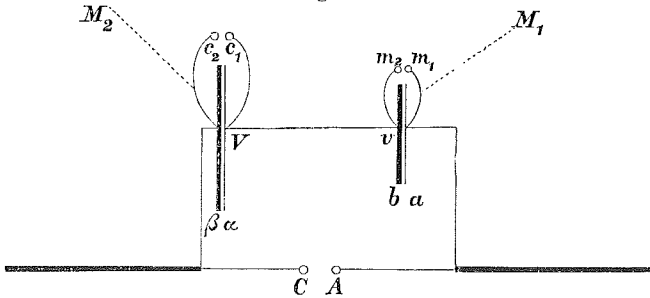
tafeln erhaltenen Resultate auf gleiche Dicken und auf gleiche zugeführte Ladungsmengen.

Um verschiedenen Kondensatorplatten stets eine gleiche messbare Elektrizitätsmenge zuführen zu können, wurde eine Massflasche in den elektrostatischen Kreis eingeschaltet.

Die Herstellung dieses letzteren gieng wie folgt vor sich:

Zunächst wurde eine der Belegungen (Fig. II,*a*) der Kondensatortafel mit einem Pol (Fig. II,*A*) einer aus 28 laufenden Scheiben bestehenden Induktionsmaschine und einer der Kugeln (Fig. II,*m*<sub>1</sub>) eines den Kondensator entladenden Funkenmikrometers (Fig. II,*M*<sub>1</sub>) in Verbindung gebracht.

Fig. II.



Die andere der beiden Leiter-Belegungen (Fig. II,*b*) führte zur zweiten Kugel des erwähnten Funkenmikrometers (Fig. II,*m*<sub>2</sub>) und zu einer der Belegungen (*α*) eines als Massflasche dienenden Blätterkondensators (*V*) von 0,054 M.F. Kapazität, der ebenso wie der kleine durch eine Funkenstrecke (*M*<sub>2</sub>) sich entladen konnte. Die zweite Belegung der Massflasche (*β*) führte zur andern Elektrode (*C*) der Elektrisiermaschine zurück.

Offenbar ist die Anzahl der übergehenden Funken an der die Massflasche entladenden Funkenstrecke proportional zur Anzahl Entladungsfunken des kleinen Kondensators und es war nun das Verhältnis der Kapazitäten der beiden Kondensatoren für alle Versuchstafeln ein solches, dass einer einmaligen Entladung des grossen, jedes Falls eine vielhundertmalige des kleinen entsprach. Da einer und derselben Anzahl Funken, die an der die Massflasche entladenden Funkenstrecke übergehen, stets die gleiche dem kleinen Kondensator zugeführte Ladungsmenge entspricht, so giebt diese Funkenzahl ein Mass für die den kleinen Kondensatoren zugeführte Elektrizitätsmenge; vermöge der grossen Kapazität der Massflasche und des daherigen spärlichen Uebergehens ihrer Entladungsfunken können diese mit Leichtigkeit abgezählt werden.

Dadurch in den Stand gesetzt, verschiedenen dielektrischen Tafeln stets eine gleiche messbare Elektrizitätsmenge zuzuführen, bedarf es nurmehr noch der Reduktion der beobachteten Erwärmungen auf gleiche Dicken, um die durch abwechselnd dielektrische Polarisirung bewirkte Wärmetönung in denselben einer vergleichenden Zusammenstellung unter sich zu unterziehen.

Diese Reduktion wird ermöglicht durch Berücksichtigung des pag. 125 der Einleitung angegebenen Gesetzes.

Die dritte Bestimmungsgrösse, das ladende Potenzial, welches bestimmt wird durch den Kugelabstand an der Funkenstrecke, blieb sich für alle auf Wärmetönung abgesetzten Dielektrika, insoweit sie in tabellarischer Uebersicht einem Vergleiche unter sich unterzogen wurden, gleich. Die Länge der Funkenstrecke war 1 mm. und

entsprach nach einschlägigen Messungen Freyberg's <sup>1)</sup> einer Potenzialdifferenz von ca. 4500 Volts.

Je nach der Beschaffenheit des zum Versuche vorliegenden Dielektrikums, wurde demselben im Ganzen jene Elektrizitätsmenge zugeführt, die 100 Entladungsfunken der Massflasche oder einem passenden Multiplum von 100 entsprach. Dünne dielektrische Tafeln erforderten 10, 20 bis 50 Funken, die dicksten 100—200. Stets sind die erhaltenen Resultate auf 100 reduziert worden.

Der Vorgang einer einzelnen Messung gieng nun in der Weise vor sich, dass nach Zufuhr einer bestimmten Elektrizitätsmenge, entsprechend einer gewissen, abgedrehten Funkenzahl, der elektro-statische Kreis in sich geschlossen, sodann das Thermo-Element mit einem Galvanometer in Verbindung gesetzt wurde.

Dieses bestand aus vier Multiplikatorrollen, wovon je zwei auf gleicher Höhe stunden. Die Anzahl der Windungen belief sich für die beiden obern Spulen auf 1020, für die untern auf 1104.

Das Nadelsystem bestand aus fünf auf gleicher vertikaler Axe befestigten Magnetnadeln mit abwechselnder Polenfolge; in jeder Spulenmitte befand sich eine Nadel, die drei übrigen über, unter und zwischen den Drahtrollen. Die Nadeln waren von dicken Kupferhülsen umgeben, die so stark dämpfend wirkten, dass die Ablesung des stationären Ausschlages schon nach 2—3 Schwingungen oder 10—15 Sec. erfolgen konnte; Strahlungsverluste wurden so auf ein Minimum reduziert.

---

<sup>1)</sup> J. Freyberg: Bestimmung von Potenzialdifferenzen, welche zu etc. (Wiedemann-Ann. Bd. 38, 1889, p. 231—56.)

Die Empfindlichkeit des Galvanometers war so gross, dass einer Temperaturdifferenz von  $1^{\circ}\text{C}$  eines Cu-Ni-Thermo-Elementes ein Galvanometerausschlag von 25,5 Scala-teilen entsprach.

Die vorzüglichen Eigenschaften des Galvanometers ermöglichten es mir, nach Acquisition etwelcher Gewandtheit innert höchstens  $1\frac{1}{2}$  Minute eine 200 Funken erfordernde Messung auszuführen, eine Zeit, für welche man annehmen darf, dass der Wärmeverlust durch Ausstrahlung keinen erheblichen Prozentsatz der ganzen auftretenden Menge bilden konnte <sup>1)</sup>.

## II. Resultate.

Vorab sei auf eine Erscheinung aufmerksam gemacht, die sich gewissermassen zur Direktive gestaltete hinsichtlich Anbringens des Thermo-Elementes in meinem eingeschlagenen Versuchsverfahren. Sie besteht darin, dass mit zunehmender Entfernung des Thermo-Elementes vom Centrum einer kreisförmigen Kondensatorbelegung, die thermischen Effekte wechselnder Polarisation in erheblicher Weise, anscheinend nach bestehender Gesetzmässigkeit wachsen und gegen den Rand hin relativ sehr grosse Werte annehmen.

In den mehrfach erwähnten Publikationen meines verehrten Lehrers über vorliegende Frage ist dieser Erscheinung bereits Erwähnung gethan und deren mutmassliche Abhängigkeit von der lokalen Dichte angedeutet worden.

Ich habe die Erscheinung systematisch an einem Glaskondensator zu verfolgen gesucht, indem auf einem

---

<sup>1)</sup> Vgl. hierüber: A. Kleiner, Wiedemanns Annalen Bd. 50.

Radius einer kreisförmigen Belegung an fünf æquidistanten Stellen die, unter sonst gleichen Umständen eintretenden Temperaturerhöhungen gemessen wurden.

Nachstehend seien zwei der vielen Tafeln wiedergegeben, wie sie sich auf diese Einzel-Erscheinung beziehend, in meinem Tagebuch niedergelegt vorfinden. Hier wie in der Folge möge gelten für die Bezeichnungen Löthstelle, Funkenzahl, Funkenstrecke, deren resp. Abkürzungen: L.St., F.Z., F.St. Es bedeuten ferner:  $\delta$  die Dicke der dielektrischen Tafel,  $d$  Durchmesser der Leiter-Belege,  $\alpha_c$  die auf 100 Funken berechneten Ausschläge, I, II, III . . . etc. verschiedene in gleichen Abständen (7 mm für Tafel I, 10 mm für Tafel II) von einander stehende Löthstellen auf einer Stanniol-Belegung.

Tafel I

$\delta = 1,15$  mm;  $d = 6,4$  cm.

F.Z. = 50

L.St.       $\alpha_c$

I	9,0
II	10,0
III	19,6
IV	26,6
V	32,0

Tafel II

$\delta = 1,24$  mm;  $d = 10$  cm.

F.Z. = 100

L.St.       $\alpha_c$

I	7,0
II	8,5
III	10,5
IV	12,0
V	13,0

Es ist ersichtlich, dass darnach in allen folgenden Untersuchungen auch darauf Bedacht zu nehmen ist, die Thermoelemente sämtlicher Versuchstafeln in gleichen Abständen vom Centrum anzubringen. Als geeigneter Ort empfiehlt sich der einfachsten und konstanten Verhältnisse halber die Mitte selbst.

Da in der Folge sämtliche direkten Beobachtungsergebnisse auf gleiche Dicken der Kondensatorplatten zu

reduzieren sind, so ist hier zunächst eine Bemerkung zu machen über das pag. 125 der Einleitung erwähnte Dicken-gesetz. Danach verhalten sich innert gewissen Grenzen, welche für verschiedene Substanzen verschiedene Werte haben, die durch abwechselndes Laden und Entladen in Dielektriciis erzeugten Wärmemengen umgekehrt wie die Quadrate der Dicken derselben; das Produkt  $d^2t$  ist also nahezu konstant. Da nun bei meinen Messungen die Dicken der untersuchten Dielektrika nicht sehr verschieden waren, 0,6 bis 3 mm, und sich innerhalb der Grenzen hielten, innerhalb deren die Abweichungen vom erwähnten Gesetz klein bleiben, so durfte dies Gesetz Anwendung finden, um die in den untersuchten Substanzen gemessenen Wärmetönungen unter sich vergleichbar zu machen.

Tafel III enthält eine vergleichende Zusammenstellung der in verschiedenen Dielektriciis — bei gleicher Ladungsmenge, gleicher Dicke, gleichem ladenden Potential — durch wechselnde Polarisation auftretenden Wärmemengen, dargestellt durch das Produkt aus den Temperaturerhöhungen  $t$  in die respektiven Dichten  $\rho$  und specifischen Wärmen  $\eta$ . Da es sich hier um einen blossen Vergleich zwischen den in verschiedenen dielektrischen Substanzen auftretenden Wärmemengen — nicht aber um die Bestimmung des absoluten Betrages derselben handelt, lässt sich  $t$  im Produkte  $t\rho\eta$  jeweilen durch den entsprechenden Galvanometeraus-schlag ersetzen; Galvanometeraus-schläge sind proportional zu den sie bedingenden Temperaturerhöhungen. Es bedeuten in der folgenden Tabelle:  $\delta$  die Dicke des Dielektrikums,  $\alpha$  den derselben entsprechende Galvanometeraus-schlag, wie er direkt für alle aufgeführten Substanzen beobachtet wurde;  $d_g$  der nach obigem Gesetze auf gleiche Dicke (1,42 mm [Glas]) reduzierte Ausschlag.



Tafel III.

F.Z. = 100; F.St. = 1 mm.

	$\delta$	$\alpha$	$\alpha_g$	$\varrho$	$\eta$	$\alpha_g \varrho \eta$
Kolophonium . . .	—	0,0	0,0	—	—	—
Paraffin . . . . .	2,6	0,2?	—	—	—	—
Glimmer . . . . .	0,58	8,5	1,4	2,8	0,213	0,834
Glas . . . . .	1,42	6,5	6,5	2,16	0,19	2,66
Quarz <u>I</u> . . . . .	1,265	8,0	6,3	2,653	0,186	3,108
„ <u>II</u> . . . . .	3,265	0,0	—	—	—	—
Kautschuk . . . . .	1,08	23,0	13,3	0,95	0,349	4,409
„ roh . . . . .	2,0	8,0	15,8	0,92	0,35	5,1
Guttapercha . . . . .	2,0	6,6	13,0	0,97	0,381	4,804
Ebonit . . . . .	3,1	4,0	14,1	1,414	0,246	4,904
Siegellack . . . . .	2,25	4,0	10,0	1,487	0,453	6,741

Eine Uebersicht der aufgeführten Zahlen zeigt grosse Verschiedenheiten im Auftreten von Wärme. Besondere Beachtung verdienen Kolophonium und Paraffin. Wie in der Beschreibung meines eingeschlagenen Versuchsvorgangs bereits erwähnt wurde, suchte ich den Einfluss der Wärmeausstrahlung und andere Fehlerquellen während der zu einer Beobachtung nötigen Zeit für die Ergebnisse meiner Beobachtungen an Kolophonium und Paraffin möglichst einzuschränken. Ungeachtet dieser methodischen Verbesserung gelang es mir keineswegs für Kolophonium auch nur eine Spur von Wärme nachzuweisen — auch dann nicht, wenn ich die für die meisten Substanzen abgedrehten 100 Entladungsfunken am Funkenmikrometer der Massflasche verdrei- oder vierfache, ebenso die Potentialdifferenz der beiden Belege durch vielfache Vergrößerung der den kleinen Kondensator entladenden Funkenstrecke erhöhte.

Der für Paraffin niedergeschriebene Ausschlag von 0,2 Skalateilen ist das Mittel 8 verschiedener, auf einander folgenden Beobachtungen, der jedoch zu klein ist, um ihn einer durch abwechselnd dielektrische Polarisation bewirkten Erwärmung der dielektrischen Schicht mit Sicherheit zuschreiben zu können. Zudem bedurfte es zur Erzeugung auch nur dieses kleinen Ausschlages der Zufuhr von über zwei- und dreihundert Funken. Wir können annehmen, Wärmeentwicklung im Dielektrikum Paraffin sei zwar nicht ausgeschlossen, wohl aber ver-schwindend klein.

Welcher Natur nun auch die durch unsere Beobach-tung untersuchte Wärmetönung sein möge, so werden wir jedenfalls die Substanzen als um so vollkommener Di-elektrika zu betrachten haben, je kleiner die in denselben auftretenden Wärmetönungen sind; es lässt sich erwarten, dass von den untersuchten Substanzen die, welche geringe Erwärmung zeigen, auch in andern Beziehungen vorzüg-liche dielektrische Eigenschaften aufweisen und sich zur Herstellung von Kondensatoren gut eignen werden, z. B. bezüglich Ladedauer und Rückstandsbildung.

Diese Vermutung suchte ich durch Versuche zu prüfen und stellte zu dem Behufe Kondensatoren von Paraffin und Kolophonium her, um sie auf ihre Ladungs-zeit untersuchen zu können.

#### Paraffinkondensator I. (Plattenkondensator)

61 kreisrunde, eben abgedrehte Paraffinplatten von 13 cm Durchmesser und 2 mm Dicke, möglichst plan-parallel und blasenfrei, sind zu einer Säule aufeinander-gelegt worden. Die zwischen je zwei solcher Platten

gefügt Stanniolbelege, die, wie erwähnt durch Aufdrücken und Anreiben an eine derselben zum festen Adhärenen gebracht werden konnten, stunden abwechselnd mit den beiden Polen einer Elektrizitätsquelle in leitender Verbindung. Eine Ladung des Kondensators zur Potentialdifferenz von ca. 100 Volts genügte, um beobachtbare Integralströme der Entladung zu geben, und genaue Bestimmungen über Ladedauer und Rückstandsbildung ausführen zu können.

Genauere Messungen ergaben beim Laden mittelst einer Batterie von 100 Elementen, bestehend aus Cu, Zn und  $H_2O$ , eine Ladedauer von höchstens 2 Sekunden. Bezüglich dieser letzteren hat sich also die Erwartung bestätigt, denn es sind bisher noch keine Kondensatoren mit festen oder flüssigen Dielektriciis von geringerer Ladungszeit bekannt geworden.

Dagegen beliefen sich die Rückstände nach Ablauf einer Minute nach der Entladung auf ca. 2%. Hinsichtlich Isolationsfähigkeit ist zu erwähnen, ein Ladungsverlust von ca. 7%, nachdem der Kondensator eine volle Minute geladen blieb; doch ist dieser grosse Verlust wohl eher den Zuleitungen als dem Dielektrikum zuzuschreiben.

Ermutigt durch dieses erzielte Resultat, suchte ich die Herstellung von Paraffinkondensatoren noch weiter zu vervollkommen und es ist mir dies auch gelungen.

### Paraffinkondensator II.

Wiewohl bei der Auswahl der für den vorhin beschriebenen Kondensator verwendeten Paraffinplatten darauf Bedacht genommen wurde, nur möglichst fehlerfreie Scheiben zuzulassen und beim Aufbau zum Kondensator

den Zutritt von Feuchtigkeit möglichst fern zu halten, so war doch zu erwarten, dass bezüglich Trockenheit und Homogenität des Kondensator-dielektrikums sich noch grössere Vollkommenheit erreichen liesse, wenn es gelänge, das Paraffin in geschmolzenem Zustande als Dielektrikum eines Kondensators zu verwenden und dann erstarren zu lassen.

Unter gütigster Leitung meines verehrten Lehrers, Herrn Prof. Dr. A. Kleiner ist die Aufgabe in der Weise gelöst worden, dass eine Serie konzentrischer Kreiscylinder in Mitte eines mit geschmolzenem, möglichst reinem Paraffin gefüllten Glasgefässes eingelassen und das Paraffin langsam erstarren gelassen wurde, nachdem es unter der Wirkung einer Luftpumpe von Blasen befreit worden.

Das System der Leiter bestand aus neun konzentrischen Kreiscylindern, aus dünnem Kupferblech, von 8 cm Höhe. Der Abstand zwischen je zwei aufeinanderfolgenden betrug 2 mm. Sämtliche Kreiscylinder wurden mit Zuleitungsdrähten versehen, die paarigen unter sich verbunden, ebenso anderseits die ungradzahligen. Um sich vergewissert zu halten, dass auch bei weitem Operationen der Abstand von 2 mm zwischen je zwei Cylindern innegehalten würde, bediente ich mich dreier dünnen Ebonitrechen, in welche diese zu 1 mm Tiefe konnten eingeklemmt werden und die dem ganzen Leiter-System übrigens auch festen Halt verliehen, so dass dieses ohne irgendwelche Schwierigkeiten in Mitte eines zur Aufnahme der dielektrischen Masse bestimmten Glasgefässes verbracht werden konnte.

Es wurde nun reines Paraffin geschmolzen, dasselbe bis zu 3 cm über die Cylinderhöhe ins Glasgefäss ge-

gossen, das Ganze, wie bereits erwähnt, so lange unter die Glasglocke einer Luftpumpe gebracht, bis die im Dielektrikum enthaltenen Blasen nurnmehr spärlich aus der Tiefe kommend, an dessen Oberfläche sich ansammelten. Nach Beendigung dieser Prozedur konnte der so geschaffene Kondensator von homogen-dielektrischer Masse und darin eingegossenem Leiter-System bis zum ersten Stadium einer beginnenden Erstarrung des Dielektrikums sich selbst überlassen werden.

Die Erstarrung erfolgte von unten nach oben und von der Peripherie nach Innen, der Mitte zu.

Um einer allfälligen Trichterbildung infolge der sehr bedeutenden Volumenänderung, die Paraffin beim Erstarren erfährt, in der Mitte der dielektrischen Masse vorzubeugen, musste darauf Bedacht genommen werden, den obern Teil dieser letzteren so lange flüssig zu erhalten, bis die Erstarrung bis zu dem innersten Kupferblech-Cylinder und nahezu bis zur obern Grenze desselben vorgeschritten war.

Messungen, die ich über Ladedauer, Rückstandbildung und Isolationsfähigkeit dieses Kondensators beim Laden mit 444 Cu-Zn-H<sub>2</sub>O Elementen vorgenommen habe, ergaben für die Ladungszeit höchstens 1 Sekunde. Wahrscheinlich ist, dass die maximale Ladung zwischen  $\frac{1}{2}$  und 1 Sekunde eintritt, was des Genauen nicht ermittelt werden konnte. Die Rückstandsbildung nach Ablauf einer Minute nach der Entladung betrug 1,4% der Ladung. Die Isolation war eine solche, dass nach 5 Minuten langem Geladenlassen des Kondensators der Ladungsverlust auf 1,9% sich belief. Nach 2 Minuten machte sich ein solcher noch fast nicht bemerkbar.

Ein an einer der Leiter-Belegungen mit der einen Löthstelle angelöthetes Thermoelement, das mit dem Galvanometer in Verbindung gesetzt werden konnte, ermöglichte auch bei diesem Kondensator die Messung thermischer Wirkungen der fortgesetzten Polarisirung.

Das Ergebnis mehrmaliger, sorgfältig ausgeführter Beobachtungen war ein zu erwartendes. Auch bei Zufuhr einer Ladungsmenge, die zwei- und dreihundert Entladungsfunken der Massflasche entsprach, liess sich nicht die geringste Temperaturerhöhung des Dielektrikums beobachten, in Uebereinstimmung mit dem oben Angegebenen.

#### Kolophoniumkondensator.

(Plattenkondensator.)

Das Ergebnis für Kolophonium in Tafel III liess mich vermuten, dass diese Substanz als Dielektrikum eines Kondensators grösserer Dimensionen verwendet, ein ähnliches, wenn nicht noch besseres Verhalten zeigen würde wie Paraffin. Die Schwierigkeiten, mit solch sprödem Material zu operieren, erwiesen sich indessen als zu bedeutend, um den Aufbau eines Kolophoniumkondensators auf gleiche Weise vornehmen zu können, wie im letztbeschriebenen Verfahren.

Ich musste mich auf die Zusammenstellung eines solchen aus kreisrund-gegossenen Platten von 3 mm Dicke beschränken, die Ausführung in ähnlicher Weise vornehmen wie beim ersterwähnten Paraffinscheiben-Kondensator.

Aus den an demselben vorgenommenen Messungen resultierte eine Ladedauer von ebenfalls kaum 1 Sekunde, ein Ergebnis, das infolge des doch immerhin

verbesserungsfähigen Verfahrens wohl zur Frage berechtigt: Welches wären die Resultate für die Ladedauer, Rückstandsbildung und Isolation, wenn die Natur des Materials eine solche wäre, dass damit in ähnlicher Weise verfahren werden könnte, wie mit Paraffin für den bereits beschriebenen Kreiscylinder-Kondensator?

\* \* \*

Noch erübrigt mir einiger interessanten Begleiterscheinungen Erwähnung zu thun, so vorab derjenigen, die ich an Siegellack habe wahrnehmen können. Sie besteht darin, dass die infolge wechselnder Polarisation im Dielektrikum zu beobachtende Temperaturerhöhung nicht sofort mit Beendigung der die Wärme produzierenden Prozedur aufhört, sondern nach längerer Zeit, nach Abschluss der Elektrisierung zunimmt, so dass der schliesslich zu beobachtende Maximalausschlag bis zum Doppelten des primären anwächst.

Wir haben es mit einem allmählichen Herauskriechen der Wärme aus dem Innern des Dielektrikums an dessen Oberfläche zu thun.

Die nämliche Erscheinung tritt auch beim Dielektrikum Glas auf, mit dem Unterschiede, dass der ganze Vorgang einen raschern Verlauf nimmt; Abkühlung tritt bedeutend rascher ein, als bei Siegellack. In beiden Fällen bedurfte es zum Nachweise der Erscheinung einer gewissen Dicke des Dielektrikums, ebenso einer Potentialdifferenz der Leiter-Belege von grösserem Belang, entsprechend einer grösseren Funkenstrecke wie der gewöhnlich benutzten von 1 mm.

Ich habe sämtliche in Tafel III aufgeführten Substanzen einer Prüfung auf dieses ihr Verhalten unter-

worfen, ohne indessen mit Ausnahme der beiden erwähnten zu ähnlichen Ergebnissen gelangt zu sein.

Noch habe ich die Beobachtungen an Quarz, Parallel- und Querschnitt bekanntzugeben. Währenddem sich an dem vorliegenden Parallelschnitt, möglicherweise wegen der erheblichen Dicke (3,265 mm) des Dielektrikums bei Zufuhr von 200 und 300 Funken durchaus keine Wärme beobachten liess, zeigte sich an einem Querschnitt eine bis jetzt unbeachtet gebliebene, seltene Erscheinung, die ich bei allen untersuchten festen Dielektrika nurmehr bei rohem Kautschuk wieder antraf.

Sie besteht darin, dass bei ein und demselben Dielektrikum, bei beständiger Mehrung der Kontrollversuche eine kontinuierliche Abnahme der beobachteten Wärmemenge zu konstatieren ist.

Zur besseren Orientierung diene folgende Versuchstabelle:

Tafel IV.  
Quarz: Querschnitt  $\perp$  zur Axe.  
F.Z. = 200; F.St. = 1 mm.

I. Tag	II. Tag		III. Tag
Ausschläge	Ausschläge		Ausschläge
	1. Serie	2. Serie	
8,0	8,0	8,0	8,0
5,5	5,2	4,5	5,3
4,9	4,0	4,0	4,5
4,8	4,0	4,0	4,2
4,5			4,2

Die gleiche Erscheinung, die ich an einem ersten und dritten Tage beobachtete, konnte an einem zweiten zweimal des Genauesten verfolgt werden.



Die in der Rubrik des zweiten Tages zwischen der ersten und zweiten Versuchsreihe verstrichene Unterbrechungszeit beläuft sich auf eine halbe Stunde. Die einmalige Beobachtung dauerte ca. zwei Minuten und es verstrichen zwischen je zwei aufeinanderfolgenden deren fünf.

Unter allen auf Wärmetönung untersuchten festen Dielektrika habe ich ein ähnliches Verhalten einzig noch bei rohem Kautschuk wahrnehmen können.

Die Regelmässigkeit im Verlaufe der Erscheinung in den verschiedenen Versuchsserien schliesst die Annahme von zufälligen Störungen der Versuchsbedingungen aus, wir haben es vielmehr mit einer anscheinend gesetzmässigen Erscheinung zu thun, die zu erklären versucht werden muss.

Eine solche Erklärung läge nahe, wenn man annehmen könnte, dass die Dielektrika Siegellack und Kautschuk ein ähnliches Verhalten zeigen, wie es von H. Hertz<sup>1)</sup> für Benzin beobachtet wurde.

Nach diesen Hertz'schen Beobachtungen verbessern sich die dielektrischen Eigenschaften von Benzin durch wiederholtes Laden und Entladen des Kondensators, der Benzin als Dielektrikum enthält. Ich konnte die beiden Substanzen nach dieser Richtung nicht untersuchen, dagegen macht mir mein verehrter Lehrer, Herr Prof. Dr. A. Kleiner, die Mitteilung, er habe die Erscheinung an einem festen Dielektrikum Paraffin, das wohl nicht ganz rein war, ausserordentlich stark ausgeprägt beobachten können; es ist anzunehmen, dass dies Ver-

---

<sup>1)</sup> H. Hertz: Ueber das Verhalten des Benzins als Isolator und als Rückstandsbildner. (Wiedemann-Annalen, Neue Folge, Bd. 20, 1883, p. 279—84.)

halten von Paraffin kein ausnahmsweises sei, sondern auch in andern Dielektriciis, wie Siegellack und Kautschuk vorkomme.

Die Erscheinung ist spezieller Untersuchungen wert.

Endlich seien noch Versuche erwähnt, die ich über den Einfluss der Ladungs-Potenzialdifferenz auf die Wärmetönung in einem beliebig dazu gewählten Dielektrikum vorgenommen habe.

Die den Kondensator entladende Funkenstrecke wurde successive in aufeinanderfolgenden Versuchsreihen vergrößert und es ergab sich als Resultat der Beobachtung die Konstanz des Quotienten aus Wärmemenge in die zugehörige Funkenstrecke, d. h. es ist die Wärmemenge proportional der Potenzialdifferenz der Ladung.

Diese Proportionalität erwies sich jedoch nur gültig für die innert 1 mm und 4,5 mm liegenden Funkenstrecken. Für kleinere Potenzialdifferenzen, wie diejenige, die einer Funkenstrecke von 1 mm entspricht, nahm das Verhältnis von Wärmemenge zur Funkenstrecke rasch ab.

Versuche für höhere elektrische Spannungen erwiesen sich einfach als undurchführbar und zwar wegen der dabei leicht nachzuweisenden Isolationsunfähigkeit des Dielektrikums. Die Ergebnisse dieser meiner Untersuchungen über den Einfluss der Potenzialdifferenz auf die Wärmetönung in Dielektriciis weichen von denjenigen H. Fritz's<sup>1)</sup> insofern ab, als letzterer die durch wechselnde Polarisation im Dielektrikum Glas auftretende Wärmemenge proportional zum Quadrate der Potenzialdifferenz gefunden hat.

---

<sup>1)</sup> H. Fritz: Ueber Wärmetönung bei elektrischer Polarisation des Glases. (Inauguraldissertation, Zürich, physik. Institut der Universität, 1893.)

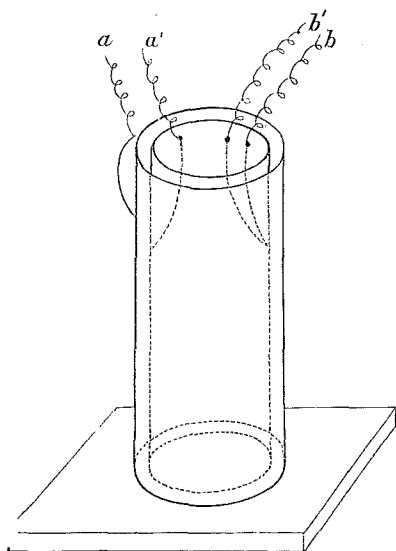
## B.

## Untersuchung flüssiger Dielektrika.

## I. Versuchsmethode.

Zwei konzentrische, 8 cm hohe Kreiscylinder aus 0,08 mm dickem Kupferblech bildeten die Leiterbelegungen, deren Zwischenraum 2 mm betrug und zur Aufnahme der dielektrischen Flüssigkeit diente. Nach oben offen, konnte dieser nach unten in der Weise begrenzt werden, dass bei sorgfältigem Innehalten der 2 mm Distanz, die beiden Cylinder so lange auf eine mit einer dünnen dickflüssigen Siegelackschicht übergossenen Glasplatte festgedrückt wurden, bis jene genügend hart war und dem Ganzen sichern Halt verlieh (Fig. III). (*a* und *a'* in Fig. III bezeichnen

Fig. III.



die beiden von einer Elektrizitätsquelle zu den beiden Belegen führenden Zuleitungsdrahte; *b* und *b'* die beiden zu einem Galvanometer führenden Zweige eines Thermo-elementes.)

Im Allgemeinen liess sich so sichere Dichtung erreichen; nur bei den aromatischen Verbindungen Benzol und Toluol war nötig, unmittelbar nach Zufüllen der Hohlräume mit denselben, den so

erreichten Flüssigkeitskondensator der Beobachtung zu unterwerfen, da infolge der leichten Löslichkeit der Siegelackunterlage durch diese Verbindungen — einerseits Verunreinigung der dielektrischen Flüssigkeit erfolgen musste, andererseits durch Ablösung derselben von den Leiter-Belegen und der Glasplatte das Dielektrikum nach einiger Zeit frei ausfliessen konnte.

Um die beiden Kreiscylinder vor allfälligen Deformationen zu schützen, sind der obere und untere Rand des äussern mit anschliessenden kreisrunden Korkringen umgeben worden, ebenso wurden in's Innere des kleinen Kreiscylinders anschliessende Korkscheibchen gefügt, die überdies im ganzen cylindrischen Hohlraume konstante Temperaturverhältnisse bewirkten, — denselben gegen allfällige Luftströmungen in wünschenswerter Weise abschlossen.

Dieser Umstand liess es mir auch zweckmässig erscheinen, das den thermischen Effekt im flüssigen Dielektrikum wiedergebende Thermoelement an die den abgeschlossenen Hohlraum des kleinen Cylinders begrenzende innere Leiterfläche anzulöthen.

Jenes musste durch das obere Korkscheibchen hindurch weiter, zum Galvanometer geführt werden.

Die Methode der Beobachtungen war im Uebrigen völlig identisch mit der bei den untersuchten festen Dielektrika eingeschlagenen.

## II. Resultate.

Bedeute  $\alpha$  die für alle sieben flüssigen Dielektrika von gleicher Dicke ( $\delta = 2$  mm) direkt abgelesenen Galvanometerausschläge für die zugehörige Funkenzahl F.Z.;  $\alpha_c$  die auf 100 Funken berechneten Ausschläge,  $\rho$  Dich-

ten und  $\eta$  spezifische Wärmen der Dielektrika, so lässt sich an Hand des Produktes  $\varrho\eta\alpha_c$  in ähnlicher Weise wie im Abschnitte A (Tafel III) ein Vergleich zwischen den in verschiedenen flüssigen Dielektriciis infolge abwechselnd dielektrischer Polarisation erzeugten Wärmemengen anstellen. Folgende Tafel giebt eine Uebersicht der gewonnenen Resultate:

Tafel IV.

F.St. = 1 mm

$\delta = 2$  mm

Substanz	F.Z.	$\alpha$	$\alpha_c$	$\varrho$	$\eta$	$\alpha_c \varrho \eta$
Liquid. Paraff.	300	0,0	—	—	—	—
Ol. Vasel. . .	300	0,0	—	—	—	—
Ol. Tereb. . .	100	2,6	2,6	0,863	0,432	0,97
Ol. Olivar. . .	200	5,0	2,5	0,911	0,64	1,46
Ol. Ricini . .	100	15,3	15,3	0,97	0,252	3,74
Toluol . . .	200	0,0	—	—	—	—
Benzol . . .	300	0,3?	—	—	—	—

Einzig für Ricinusöl ergab sich sonach ein thermischer Effekt von Belang; die Ergebnisse für Oliven- und Terpentinöl reichen kaum an jene der meisten festen Dielektrika und Benzol haften bedeutende Unsicherheiten an, herrührend von der unstäten Ruhelage in allen damit vorgenommenen Untersuchungen.

Bei allen übrigen Dielektriciis war auch nicht eine Spur von Wärme erhältlich.

Bei Terpentinöl ist übrigens auf eine Erscheinung aufmerksam zu machen, die wir bereits schon an Quarz ( $\perp$ -Schnitt) und rohem Kautschuk haben wahrnehmen können. Bei steter Mehrung der am Dielektrikum vorgenommenen Untersuchungen auf Wärmetönung und Inne-

halten einer nämlichen Frist zwischen je zwei einander folgenden ergeben sich verschiedene Resultate und zwar offenbaren sich diese Abweichungen auch hier in abnehmendem Sinne.

Es ist anzunehmen, dass auch diese Erscheinung zusammenhängt mit der bereits erwähnten Wahrnehmung von H. Hertz <sup>1)</sup> am Dielektrikum Benzin, dass diese Substanz als Isolator verwendet, durch Elektrisierung gereinigt, seine Qualität als Dielektrikum eines Kondensators durch mehrfache Ladung verbessert wird.

### Besprechung der gefundenen Resultate.

In der Einleitung sind die vorstehend angeführten Beobachtungen bezeichnet als Beiträge zur Lehre von der «dielektrischen Hysteresis» und es lassen in der That die Versuchsergebnisse ausnahmslos und ungezwungen durch den hier eingenommenen Standpunkt sich verstehen; indessen ist auch der oben erwähnte Standpunkt von Herrn G. Benischke nicht ohne Weiteres durch die Versuche ausgeschlossen; ja es steht sogar mit demselben sehr gut in Uebereinstimmung, dass die zu beobachtenden Wärmetönungen um so beträchtlicher sind, je unvollkommener die untersuchten Dielektrika in elektrischer Beziehung sind und es ist ja die dielektrische Vollkommenheit wohl in erster Linie durch die Isolationsfähigkeit gegeben. In den bekanntermassen guten Isolatoren Paraffin und Kolophonium ist der untersuchte Effekt verschwindend klein, grösser schon in den weniger vollkommenen Isolatoren.

---

<sup>1)</sup> H. Hertz: Ueber das Verhalten des Benzins als Isolator und Rückstandsbildner. (Wiedemann-Annalen Bd. 20, Neue Folge p. 279—84, 1883.)

Indessen bestehen offenbar in Kondensatoren im Allgemeinen Spuren von Leitung und Polarisation neben einander und es ist wohl denkbar, dass mit zunehmender Vollkommenheit der Isolation, Hand in Hand geht eine Zunahme der Reinheit, beziehungsweise Promptheit, mit welcher die Polarisationsvorgänge den einwirkenden Kräften folgen.

Eine direkte Entscheidung über die Möglichkeit von Herrn G. Benischke's Anschauung liesse sich geben durch genaue absolute Messungen von Leitungswiderstand, Potenzialdifferenz zwischen den Belegungen der Kondensatoren, der zugeführten Elektrizitätsmenge und der beobachteten Wärmetönung. Solche Bestimmungen sind nicht ausgeführt worden. Sie dürften ihre sehr grossen Schwierigkeiten haben.

Indessen lässt sich dieser Frage auch in anderer Weise beikommen: Wenn die beobachtete Wärmetönung Joule'sche Wärme ist, nach Herrn G. Benischke, dann ist das Auftreten derselben nicht an den Wechsel der Ladungszustände in den Kondensatoren gebunden, sondern müsste auch zu beobachten sein bei dauernder Ladung der Kondensatorbelegungen bis zu einer konstanten Potenzialdifferenz. Tritt bei dauernder, konstant unterhaltener Potenzialdifferenz keine Erwärmung im Dielektrikum ein, dann kann die uns beschäftigende Wärmeerregung nicht Joule'sche Wärme sein.

Und darüber nun sind in einfachster Weise einige Messungen ausgeführt worden.

Als Dielektrikum verwendete ich bei diesen Versuchen eine dünne Glimmerplatte. Bei einer Potenzialdifferenz ihrer Leiter-Belegungen von 8600 Volts, die an einem Thomson'schen Vertikal-Elektrometer beobachtet

wurde, und welche ich in verschiedenen Kontrollversuchen durch langsames Drehen der Scheiben einer kleinen Elektrisier-Maschine 1—3 Minuten ohne eine Entladung eintreten zu lassen, konstant zu erhalten bemüht war, ergab sich keine Erwärmung der dielektrischen Schicht.

Es lässt sich dieses Resultat keineswegs etwa auf die Möglichkeit zurückführen, es wäre die auf den Belegen angesammelte Elektrizitätsmenge in der Zeit, während welcher ich sie auf der nämlichen Potenzialdifferenz zu erhalten bemüht war, durch Leitung entwichen, denn die nach Ablauf einer jeden Beobachtung jeweilen bewirkte Entladung liess mich genau erkennen, dass die Spannung, zu welcher der Kondensator geladen wurde, die ganze Zeit über annähernd auf der nämlichen Höhe verblieb.

Giengen wir nun aus von der Annahme, Wärmeentwicklung in Dielektricis lasse sich auf Eindringen von Elektrizität ins Innere der dielektrischen Schicht zurückführen, so stossen wir auf Widerspruch, da sich nicht einsehen lässt, wie Wechselströme thermische Effekte von Belang im Innern des Dielektrikums hervorzurufen vermöchten, nicht aber ein konstanter Strom von gleicher Dauer bei gleicher Potenzialdifferenz.

Es scheint mir dies ganze Verhalten darauf hinzuweisen, dass wir zur Erklärung von Wärmeentwicklung in Dielektricis durch abwechselnd elektrisches Laden und Entladen wohl mit Recht davon abstrahieren dürfen, die Erscheinung im Zusammenhange mit der blossen Tatsache, dass von den festen Dielektrika vielleicht besser isolierende im Allgemeinen weniger bedeutende Wärmemengen aufweisen wie weniger gut isolierende — ohne Weiteres auf einen Leitungsprozess zurückzuführen und



damit die in verschiedenen Dielektricis nachgewiesenen Wärmemengen als Joule'sche Wärme zu betrachten.

Ich glaube demnach, dass wir an der von Steinmetz, Arnò etc. und auch in den jüngsten Mittheilungen meines verehrten Lehrers zu vorliegender Frage wiederum ausgesprochenen Ansicht, Wärmetönung in Dielektricis lasse sich auf «dielektrische Hysteresis» zurückführen — festhalten dürfen.

Zur Besprechung der einzeln gewonnenen Resultate übergehend, dürfte vorerst die nachgewiesene Abhängigkeit zwischen der Grösse der thermischen Effekte und dem Abstände der dieselben bestimmenden Thermo-elemente von den Belegungscentren Beachtung finden.

Die Wahrnehmung, dass mit zunehmender Entfernung vom Centrum der metallischen Belegung eines Franklin'schen Täfelchens die diesen einzelnen Abständen entsprechenden thermischen Ausschläge zunehmen, legt uns den Versuch nahe, die Erscheinung mit der Anordnung der Elektrizität auf den beiden kreisrunden Leiter-Belegungen in gesetzmässige Uebereinstimmung zu bringen.

Clausius <sup>1)</sup> betrachtet in einer Abhandlung die Anordnung der Elektrizität auf einer Ellipsoidoberfläche und gelangt im Laufe seiner Untersuchungen zu einer Formel, welche uns die lokale Dichte der Elektrizität auf einer dünnen kreisrund-metallischen Belegung als Function der gesamten darauf sich befindenden Elektrizitätsmenge, des Radius der Belegung und des Abstandes eines fraglichen Punktes vom Centrum derselben wiedergiebt.

Ausgehend von einem Ellipsoid, denkt sich Clausius Elektrizität über dasselbe in der Weise verbreitet, dass

<sup>1)</sup> Clausius: (Annalen der Physik und Chemie Bd. 162, p. 161—205, 1852.)

die Gesamtmenge als eine zwischen zwei ähnlichen und konzentrischen Ellipsoidflächen eingeschlossene, sehr dünne Schicht sich auffassen lasse — eine Voraussetzung, welche auch dann besteht, wenn die drei Axen des Ellipsoides in beliebigen Verhältnissen zu einander stehen, somit eine derselben auch  $\infty$  klein gedacht werden kann. Als dann gieng das Ellipsoid in eine  $\infty$  dünne ellipsenförmige Platte über.

Die elektrische Dichte auf den beiden sich nähernden ellipsoidischen Halbfächen zusammen, ergiebt dann die gesuchte Dichte auf der elliptischen Ebene.

Clausius findet hierfür:

$$(I) \quad \delta = \frac{Q}{2 a^2 \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}}, \quad \text{worin bedeuten:}$$

$\delta$  die gesuchte elektrische Dichte für einen beliebigen Punkt der Belegung im Abstände  $r$  vom Centrum derselben,  $a$  den Radius und  $Q$  die gesamte, auf der metallischen Belegung vorhandene Elektrizitätsmenge.

Diese Formel gilt offenbar für eine jede der beiden metallischen Kreisflächen, auch wenn sie entgegengesetzt geladen sind.

In welcher Weise nun die für einen beliebigen Punkt der metallischen Belegung beobachtete Wärme von der auf derselben herrschenden elektrischen Dichte abhängt, könnten wir erfahren, indem wir auf einer und derselben Kondensatorbelegung für verschiedene Abstände vom Centrum die respektiven thermischen Ausschläge bestimmen, und für die Abstände, die aus unserer Formel sich ergebenden Dichten einsetzen würden.

Da nach oben erwähnten Versuchen meines verehrten Lehrers, Herrn Prof. Dr. A. Kleiner und anderer,

die Wärmetönung sich nahe proportional dem Quadrate der zugeführten Elektrizitätsmengen ergab, so liegt nahe, dass sie an jeder Stelle proportional dem Quadrate der Dichte sei. Dies vorausgesetzt ergibt sich:

$$(II) \quad \sigma = c \delta^2, \quad \text{worin bedeuten:}$$

$\sigma$  die gesuchte Wärmemenge,  $c$  die Proportionalitätskonstante und  $\delta$  die durch Gleichung I bestimmte lokale Dichte.

Bedeutен ferner  $\delta_1$  und  $\delta_2$  die Dichten zweier in verschiedenen Abständen  $r_1$  und  $r_2$  vom Centrum liegenden Punkte;  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  die respektiven thermischen Ausschläge.

Gemäss Gleichung II müsste bestehen:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\delta_1^2}{\delta_2^2}, \quad \text{oder:}$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\left( \frac{Q}{2 a^2 \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_1^2}{a^2}}} \right)^2}{\left( \frac{Q}{2 a^2 \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_2^2}{a^2}}} \right)^2}, \quad \text{woraus:}$$

$$(III) \quad \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{(a^2 - r_2^2)}{(a^2 - r_1^2)}.$$

Es ist zwar zu erwähnen, dass obiger Gedankengang in erster Linie nur theoretische Bedeutung haben kann, denn Clausius trifft die Einschränkung, dass die Platte vollkommen isoliert vorausgesetzt werde, so dass auch im Falle die elektrische Dichte gegen den Rand hin  $\infty$  gross würde, keine Elektrizität entweichen könnte.

Ideale Verhältnisse hinsichtlich Isolation bei unsern Versuchen zu erzielen, dürfte wohl kaum möglich sein,

schon des Umstandes halber, dass sich vollkommen glatte Ränder bei solch dünnen Stanniolbelegen nicht leicht ausführen lassen. Kleine Spitzen und Ecken derselben werden eben stets günstige Entweichungspunkte für die auf der Oberfläche angesammelte Elektrizitätsmenge bilden.

Gleichwohl halten die in Tafel I und II im Abschnitte A niedergelegten Resultate einen Vergleich mit obiger Ableitung insofern aus, als sich beim Einsetzen der experimentell gewonnenen Resultate in Gl. III ein Widerspruch in qualitativer Beziehung nicht ergeben wird.

In keiner in meinem Tagebuche aufliegenden Versuchstabellen, die sich auf diese Erscheinung beziehen und unter normalen Verhältnissen ermittelt wurden, bietet sich der Fall, dass beispielsweise die für einen Punkt im Abstände 10 mm vom Centrum der Belegung nachgewiesene Wärmemenge diejenige eines Punktes im Abstände 11—12 mm übersteigt.

Möglich, dass sich an Hand mehr zweckmässiger Versuchsbedingungen Uebereinstimmung auch in quantitativer Richtung zwischen Theorie und Beobachtung wird nachweisen lassen.

Diese Abhängigkeit der Wärmetönung von der lokalen Dichte lässt sich verstehen von dem von uns eingenommenen Standpunkte aus, nicht aber unter der Annahme, dass diese Wärme Stromwärme sei, da die Potenzialdifferenz auf den Kondensatorbelegungen und damit die Strömungsintensität überall dieselbe ist.

Tabelle III und IV in den respektiven Abschnitten A und B beweisen, dass Auftreten von Wärme in Dielektricus — erzeugt durch wechselnd elektrische Polarisation — nicht notwendig zu erfolgen hat. Es ergibt

sich dies, wie bereits erwähnt, aus den bedeutenden quantitativen Unterschieden einerseits — anderseits sprechen dafür besonders die Thatsachen, dass sich trotz mehrfacher Abänderungen der Versuchsmethode in Paraffin und Kolophonium mit Sicherheit auch nicht eine Spur von Wärmewirkung nachweisen liess.

Währenddem wir aber im Abschnitte A aus diesem auffälligen Verhalten von Paraffin und Kolophonium folgerten, es möchten diese Substanzen als vorzügliche Dielektrika von Kondensatoren grösserer Dimensionen vorteilhaft Verwendung finden, — diese Vermutung an Hand geeigneter Versuche dann auch bestätigen konnten, — glaube ich das indifferente Verhalten vorab der untersuchten aromatischen Verbindungen Benzol und Toluol (Abschnitte B, Tab. IV) auf ungenügende Isolationsfähigkeit derselben zurückführen zu müssen, da diese Substanzen nicht genügend isolieren, um eigentliche dielektrische Polarisation zu Stande kommen zu lassen. Ich nehme dagegen an, dass das Verhalten von Liquid. Paraff. und Ol. Vasel. auf die nämliche Ursache wie für die beiden festen Dielektrika Paraffin und Kolophonium sich zurückführen lässt. Diese Substanzen sind ja auch chemisch und bezüglich Leitungsfähigkeit nahe verwandt.

Was die im Abschnitt A an Siegellack und Glas beobachtete Erscheinung betrifft, wonach die zu beobachtenden Temperaturerhöhungen erst einige Zeit nach Abschluss der Versuche sich einstellen, so ist dafür schwer eine Erklärung zu finden. Jedenfalls handelt es sich dabei um ein langsames Heraustreten von Wärme aus dem Innern des Dielektrikums an dessen Oberfläche; dafür sprechen die Resultate von Versuchen, bei welchen die Löthstelle des Thermoelementes statt an der Ober-

fläche des Kondensators, in der Mitte der Siegellackplatte angebracht wurden; in diesem Falle trat der maximale thermische Ausschlag sofort nach der letzten Entladung des Kondensators ein.

Die Polarisationsvorgänge im Innern der Substanzen, wie Siegellack und Glas scheinen also andere zu sein als an den Grenzschichten; es wird dies nur verständlich, wenn eine Aenderung der Polarisationszustände in gleichen Zeiten nicht im ganzen Dielektrikum gleichzeitig auftritt, sondern irgendwie langsam sich fortpflanzt, oder auch wenn das Dielektrikum als solches nicht in der ganzen Masse gleichartig, nicht homogen, ist.

Jedenfalls aber muss die Erscheinung zu erklären versucht werden, da sie möglicherweise nicht unwesentlich zur Kenntnis der Lehre von der «dielektrischen Hysteresis» beitragen dürfte.

Was endlich die Beobachtungen an Quarz ( $\perp$ Schnitt), rohem Kautschuk und Terpentinöl betrifft, so ist in den Abschnitten A und B auf eine Erscheinung aufmerksam gemacht worden, welche H. Hertz am Dielektrikum Benzin wahrgenommen hatte und die, wie erwähnt, das auffällige Verhalten auch dieser drei Substanzen erklären dürfte.

---

Meinem hochverehrten Lehrer Herrn Prof. Dr. A. Kleiner erlaube ich mir an dieser Stelle den verbindlichsten Dank auszusprechen für die vielseitige Unterstützung und Anregung, welche er mir bei Ausführung der vorliegenden Arbeit in seinen Laboratorien in gütigster Weise hat angedeihen lassen.

Zürich, im Februar 1895.

---