

7. *Über die Nachwirkungen bei dielektrischer Erregung;* *von Ernst Schreiber.*

(Auszug aus einer Göttinger Inaugural-Dissertation.)

A. Einleitung.

Die vorliegende Arbeit ist auf Anregung des Herrn Geheimrat Prof. Dr. E. Riecke im Physikalischen Institut der Universität Göttingen ausgeführt und soll einen Beitrag zu dem Verhalten fester Dielektrika nach der Einwirkung eines elektrischen Feldes liefern. Die grundlegenden Arbeiten zu diesem Studium bieten die Untersuchungen über die Erscheinungen des elektrischen Rückstandes.

Im ersten Teile werden die experimentellen Untersuchungen und Resultate beschrieben. Der zweite Teil behandelt als kurzen Anhang eine Anwendung unserer Versuchsergebnisse auf die Theorie der elastischen Nachwirkungen von E. Wiechert.

B. Experimenteller Teil.

§ 1. Die benutzten Apparate.

a) Versuchsapparat.

Die Untersuchungsmethode beruht auf folgendem Prinzip: In einem Zylinderkondensator wird ein Isolator frei aufgehängt und durch ein elektrisches Feld dielektrisch erregt. Nach Abnahme des Feldes gleitet das Dielektrikum in einen zweiten Zylinderkondensator und influenziert die innere Elektrode, die mit einem Quadrantenelektrometer verbunden ist. Diese Methode unterscheidet sich prinzipiell von den älteren Arbeiten über die Erscheinung des elektrischen Rückstandes und bietet einen doppelten Vorteil. Erstens wird hierdurch ein Eindringen elektrischer Ladung von der Elektrode in das Innere des Dielektrikums vermieden, zweitens sind die Isolatoren, die

mit der zur dielektrischen Erregung dienenden Hochspannungsleitung in Berührung stehen, gleichzeitig nicht mit der Elektrometerleitung verbunden. Um den gestellten Forderungen zu genügen, ist folgende Anordnung getroffen: In einem großen Messingzylinder *C* (Figg. 1 u. 1a) von 30 cm Länge und 11,3 cm lichter Weite, der einen elektrostatischen Schutz gegen äußere Störungen bieten soll, befinden sich zwei Zylinderkondensatoren. Der obere Kondensator, in dem das elektrische Feld erzeugt wird, besteht aus einem äußeren Messingzylinder *A* von 15 cm Länge und 5,4 cm lichter Weite und einer inneren Messingelektrode *B* von 15 cm Länge und 8 mm Dicke. Der untere Kondensator setzt sich aus einem äußeren Messingzylinder *A'* von 8,5 cm Länge und 5,4 cm lichter Weite und einem inneren Zylinder *B'* von 8 cm Länge und 8 mm Dicke zusammen. Einen festen Halt und genaue Symmetrie des ganzen Systems sichert folgende Konstruktion: Auf einem mit zwei Stellschrauben versehenen Dreifuß sind drei Messingröhren von 30 cm Länge aufgeschraubt, die eine Messingplatte *D* von 20 cm Durchmesser und 4,5 mm Dicke tragen. Zwei zueinander senkrecht stehende, hochempfindliche Röhrenlibellen, die durch Schrauben auf der Platte *D* befestigt sind, gestatten, diese einzustellen. Aus der Mitte von *D* wird ein Loch von 5,6 cm lichter Weite geschnitten, in das der Zylinder *A'* eingelötet ist. Diesen verschließt unten eine zweite in ihn genau eingepaßte Messingplatte *D'*. In einer in der Mitte von *D'* angebrachten Durchbohrung sitzt der durch echten Bernstein isolierte Zylinder *B'*, den ein dünner Messingdraht von 0,13 mm Dicke mit dem einen Quadrantenpaar eines Dolezalek-Quadrantenelektrometers verbindet.

Der auf einer Drehbank laufend gedrehte Zylinder *C* steht senkrecht auf der Messingplatte *D*. Drei an Zylinder *A'* festgelötete Führungsstücke aus Messing haben eine solche Größe, daß der auf *D* aufgesetzte Zylinder *C* von *A'* gleichweit entfernt ist. Drei Schrauben verbinden *C* fest mit *A'*. In ähnlicher Weise wird Zylinder *A* durch sechs Führungsstücke (drei oben und drei unten) an *C* befestigt. Diese sind so eingesetzt, daß *A* von *C* gleichen Abstand hat. Den Zylinder *C* verschließt ein laufend gedrehter Messingdeckel *E*. Durch ein in seiner Mitte gebohrtes Loch führt eine Ebonitisolation,

in die der mit der inneren Elektrode *B* verbundene Messingdraht von 4 mm Dicke fest eingesteckt ist. Das Ebonitstück wird so abgedreht, daß sich Elektrode *B* genau in der Mitte

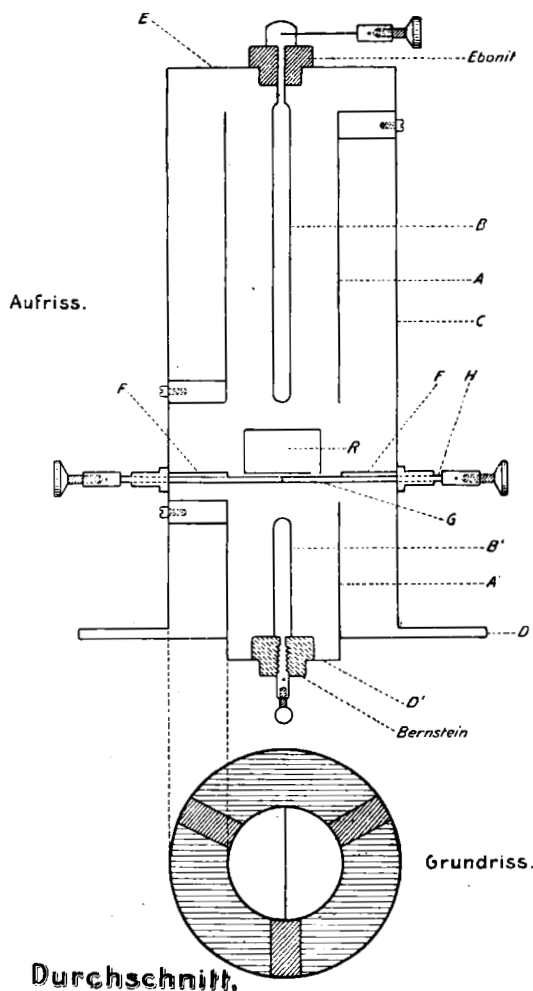


Fig. 1.

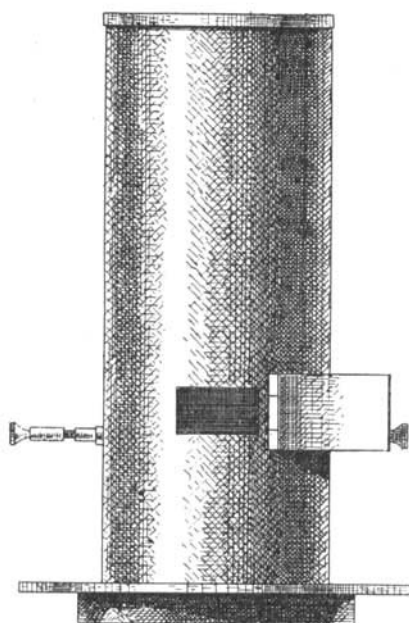


Fig. 1a.

des oberen Kondensators befindet. Eine in 9 cm Höhe im Zylinder *C* eingeschraubte Messingscheibe *F* trennt die beiden Zylinderkondensatoren. In ihrer Mitte hat sie einen kreis-

förmigen Ausschnitt von 5,61 cm lichter Weite, damit das Dielektrikum ungestört von dem einen in den anderen Kondensator gleiten kann. Um die Bernsteinisolation der unteren Elektrode B' gegen die Wirkung des im oberen Kondensator angelegten Feldes und dadurch bewirkte Rückstandsbildung zu schirmen, und irgendwelche durch das erregte Dielektrikum bedingte Influenz der Elektrode B' während der Messung unschädlich zu machen, wird der Ausschnitt durch zwei halbkreisförmige Messingscheiben G verschlossen. Diese haben mittels zweier dreikantiger Messingstangen H eine feste Führung durch Zylinder C .

Innerhalb des oberen bzw. unteren Zylinderkondensators hängt das in Zylinderform verfertigte Dielektrikum. Drei Zäpfchen aus dem betreffenden Material werden symmetrisch auf der oberen Fläche aufgekittet. Durch ihre Durchbohrung führen Kokonfäden, die an einem dünnen Messingkettchen befestigt sind. (Die Isolation des Kokon erwies sich nach mehrfacher Prüfung als ganz vorzüglich. Da jedoch seine hygroskopische Eigenschaft eine Leitfähigkeit während der langen Dauer der einzelnen Versuche nicht ausschließt, wird er zur Sicherheit mit dem zu untersuchenden Material durchtränkt (bei dem Ebonitzylinder wurde reiner Kokon benutzt)). Die Messingkettchen gehen durch drei in den Deckel E symmetrisch gebohrte Löcher und hängen in drei Messingstangen von 9,6 cm Länge und 4 mm Dicke. Diese sind in eine Messingscheibe von 4 mm Dicke und 6 cm Durchmesser eingeschraubt. Die Scheibe hängt in ihrer Mitte an einem dünnen, gut geerdeten Messingdraht und gleichzeitig an einem gewöhnlichen Bindfaden (um ein Zerreißen des Drahtes zu verhindern) Der Messingdraht und Bindfaden laufen über eine Messingrolle J und enden auf einem Haspel. Auf der Achse des Haspels sitzen zwei weitere Scheiben. Diese tragen zwei Anschläge, deren Abstände gleich der Fallhöhe des Isolators vom oberen bis unteren Kondensator gewählt werden. Die Anschläge sind aus Kork verfertigt und schlagen gegen zwei mit Filz versehene Spiralfedern, die auf ein Holzbrett geschraubt sind. Dieses verbinden zwei starke Schrauben mit einem Wandbrett.

Die Rolle J läuft in einer Flasche, die in den Messingring L eingeschraubt ist (Fig. 2). In L ist J nach allen Seiten

frei beweglich und kann in einer bestimmten Stellung durch eine Mutter *M* an *L* festgeklemt werden. Den Ring *L* durchsetzt oben eine zweite Schraubenspindel *N*, die in einer in die Eisenstange *O* eingelassene Rinne geführt wird und durch leichtes Anziehen den Ring *L* mit *O* fest verbindet.

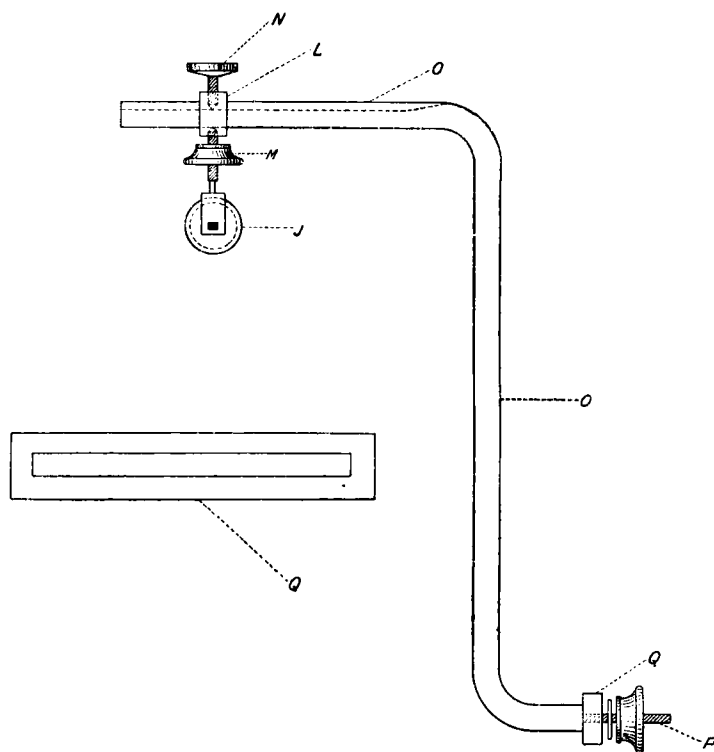


Fig. 2.

Die Stange *O* ist zweimal rechtwinklig gebogen und hat am unteren Ende einen Ansatz *P*, der durch die geschlitzte Querstange *Q* gesteckt werden kann. Der Ansatz *P* trägt ein Gewinde und wird mittels einer Schraubenmutter an *Q* befestigt. Auf zwei Eisenplatten, die in der Zimmerwand eingepipst sind, wird die Querstange *Q* festgeschraubt. Diese Aufhängung ermöglicht eine genaue Zentrierung des Isolators. Zu diesem Zwecke sind noch an dem großen Zylinder *C* und auf dem

Deckel *E* je ein Ausschnitt *R* und *S* angebracht, die durch Messingplatten leicht verschlossen werden.

b) Stromquelle.

Das elektrische Feld erzeugt eine an die innere Elektrode *B* des oberen Zylinderkondensators angelegte Spannung, die zwei bzw. eine Hochspannungsbatterie von je 800 Zellen liefern. Um diese vor einer etwa durch Kurzschluß bewirkten direkten Stromentnahme zu sichern, ist zwischen *B* und der Batterie ein Jodcadmiumwiderstand eingeschaltet.

c) Messinstrumente.

Zur Messung der am oberen Kondensator angelegten Spannung dient ein Braunschkes Elektrometer vom Meßbereich 0 bis 3500 Volt, das mit der Elektrode *B* parallel geschaltet ist. Die Eichungscurve zeigt eine gute Übereinstimmung mit der im Elektrometer angebrachten Skala; die größten Abweichungen betragen ca. 2,5 Proz., die, wie die Versuche ergaben, keinen wesentlichen Fehler bedingen.

Die in der inneren Elektrode *B'* durch Influenz erzeugte Ladung wird mit einem Dolezalek-Quadrantenelektrometer, dessen Quadrantenpaare durch echten Bernstein gut isoliert sind, gemessen. Die Nadel hängt an einem 0,04—0,07 mm dicken Quarzfaden, der nach einem von Bestelmeyer¹⁾ angegebenen Verfahren durch Zerstäuben einer Platinkathode leitend gemacht ist, und wird mit einer Westonbatterie nach Krüger²⁾ auf ein konstantes Potential 100 Volt geladen. Ablesefernrohr nebst Skala sind vom Spiegel der Nadel 3 m entfernt.

In dieser Anordnung beträgt die Empfindlichkeit $2 \cdot 10^{-4}$ Volt pro Millimeter der Skala. Als elektrostatischen Schutz umschließt den unteren Teil des zwischen dem Dreifuß aufgestellten Elektrometers ein Messingkasten, dessen Grundplatte gut geerdet ist. In seinem Innern befindet sich der Rutherfordsche³⁾ Schlüssel, der leicht die Erdverbindung des einen

1) A. Bestelmeyer, Zeitschr. f. Instrumentenk. 25. p. 339. 1905.

2) F. Krüger, Phys. Zeitschr. 7. p. 182. 1906.

3) E. Rutherford, Radioaktivität p. 99. 1907. Deutsche Ausgabe.

Quadrantenpaares aus größerer Entfernung zu schließen und zu öffnen gestattet. Ein sicheres Arbeiten seines Quecksilberkontaktes ist durch die auf der Oberfläche des Hg sich allmählich bildende dünne Oxydschicht gefährdet. Denn hierdurch werden elektrostatische Effekte ausgelöst, die den einwandfreien Verlauf des Versuches stören. Um diese Fehlerquelle auszuschalten, tritt an Stelle des Quecksilberkontaktes ein solcher aus Platin, indem ein Platinstift auf einem Platinplättchen, das durch echten Bernstein gut isoliert ist, fest aufsitzt.

Das zweite Quadrantenpaar bleibt dauernd mit der Erde verbunden.

Den oberen Teil des Elektrometers umgibt ein Messingzylinder von 13,5 cm lichter Weite und 10 cm Länge, der in einen auf die untere Seite der Messingplatte *D* gelöteten Ring festgesteckt ist. Durch ihn geht seitlich der in Messingröhren eingeschlossene Zuleitungsdraht von Westonbatterie bis zur Nadel. Unten ist in den Messingzylinder eine zweite Röhre gelötet, die der von Elektrode *B'* nach dem Quadrantenpaar führende Messingdraht durchsetzt. Selbstverständlich sind alle zum Elektrometer gehenden Zuleitungen von den geerdeten Messingröhren durch Bernstein isoliert. Statische Ladungen des Bernsteins (bewirkt durch Reiben der dünnen Drähte an den Isolationen) werden durch Messingröhrchen, die in ihn fest eingepaßt sind, vermieden.

§ 2. Die Dielektrika.

Auf ihre Nachwirkung werden untersucht: Kolophonium, Ebonit, Schellack, Siegelack, Paraffin und Schwefel. Die Herstellung der Isolatoren ist in der Dissertation¹⁾ ausführlich beschrieben.

Mit Ausnahme des Kolophoniums werden alle anderen Substanzen auf der Drehbank in Zylinderform angefertigt. Um sie im oberen Versuchsraume einem homogenen elektrischen Felde auszusetzen, sind sie 75 mm lang, was der halben Länge des oberen Kondensators entspricht. Der Durchmesser von 43,55 mm und die lichte Weite von 18,1 mm

1) E. Schreiber, Gött. Inaug.-Diss. 1912.

sind so gewählt, daß sie von dem inneren bzw. äußeren Zylinder 5 mm entfernt sind. Hierdurch wird verhütet, daß elektrische Ladungen (vermittelt durch Staubteilchen oder feine Fäserchen) auf sie direkt übergehen. In einem Exsikator werden sie aufbewahrt und durch einen Schutzkasten gegen die Einwirkung des Tageslichtes geschützt.

Frisch hergestellte Isolatoren zeigen ein höchst eigentümliches Verhalten. Um alle statischen Ladungen wegzunehmen, wird das zuerst untersuchte Kolophonium vorsichtig durch eine Flamme geführt. In den Apparat eingesetzt, zeigt die Nadel des Quadrantenelektrometers zunächst keinen Ausschlag. Nach kurzer Zeit wächst jedoch die Ladung auf der Oberfläche des Zylinders bis zu einem maximalen Betrage von 330 Skt. Ausschlag an. Erst nach sechs Wochen ist der Zylinder ladungsfrei.

Ein recht interessantes Beispiel bietet Siegelack. 14 Tage nach seiner Herstellung wird er im Apparate $\frac{1}{2}$ Stunde Röntgenstrahlen, die in einer Röntgenröhre erzeugt werden, ausgesetzt. Kurz nach dem Versuche ist alle Ladung verschwunden, aber bereits am folgenden Tage zeigt sich ein deutlicher Ausschlag von 4 Skt., der nach vier Tagen auf 150 Skt. angestiegen ist. Auf den Zylinder wirkt dann 48 Stunden ein radioaktives Präparat, Polonium, ein. Auch diese Methode hat einen negativen Erfolg. Erst nach einem halben Jahre bringt der 48 stündige Einfluß des Poloniums alle Oberflächenladung zum Verschwinden. — Als ungefährlches radioaktives Präparat wird Polonium benutzt, das auf einer Metallplatte niedergeschlagen ist. Auf einem Glasplättchen befestigt, wird es mit der größten Sorgfalt in den Apparat gebracht, um den zu untersuchenden Zylinder seiner Einwirkung auszusetzen. Nach seiner Entfernung zeigt eine genaue Prüfung keine störende Nachwirkung. —

Der Verlauf dieser merkwürdigen Erscheinung wird an Schellack näher verfolgt. Der frisch hergestellte Zylinder wird sieben Tage nach seiner Bearbeitung auf der Drehbank im Versuchsapparat aufgehängt und 48 Stunden Polonium ausgesetzt. Bereits zwei Stunden, nachdem das Präparat entfernt ist, zeigt das Elektrometer einen Ausschlag von 2 Skt., der nach einer Woche den maximalen Betrag von 19,2 er-

reicht. Das Anwachsen der Ladung geschieht in ganz unregelmäßiger Form, oft ist an einem Tage ein deutlicher Rückgang zu finden, da folgt schon am folgenden Tage ein Ausschlag bis zu 6—7 Skt. Nach $1\frac{1}{2}$ Monaten konnte mit der eigentlichen Untersuchung begonnen werden.

Diese Erscheinungen legen die Vermutung nahe, daß in frisch gegossenen und mechanisch bearbeiteten Isolatoren Spannungen vorhanden sind, deren Ausgleich die Oberflächenladungen verursacht. Für diese Annahme spricht der Umstand, daß ein Isolator durch leichte Erschütterungen, wie sie sich bei dieser Versuchsanordnung durch sehr schnelles Abrollen der Zylinder, ohne daß sie dabei den Boden des Apparates berühren, hervorrufen lassen, dauernde Ladungen aufweist, die wohl durch Molekularkräfte (Spannungen) ausgelöst sind. Fast eine ganze Woche vollständiger Ruhe ist nötig, um die Untersuchung fortzusetzen, während durch Reiben an den Metallwänden verursachte Ladungen durch Polonium sofort für immer verschwinden.

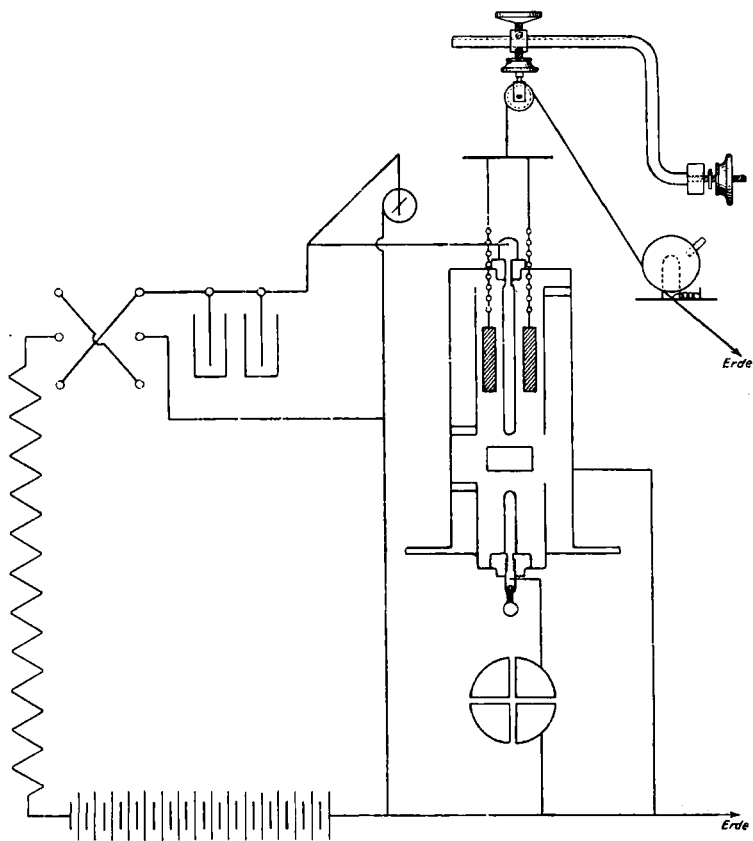
Um die Dielektrika gebrauchsfähig zu machen, werden sie daher in einem Exsikkator, dessen Grundplatte durch Zinnfolie gut geerdet ist, eingeschlossen und $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$ Jahr ohne Lichtzufuhr sich selbst überlassen. Dann genügt eine Einwirkung unseres Präparates, um binnen kurzer Zeit die statischen Ladungen, die sich bei etwas unvorsichtigem Einsetzen durch Reiben gebildet haben, aufzuheben.

§ 3. Versuchsanordnung.

Nachfolgende Skizze zeigt uns das Schaltungschema in seiner benutzten Form.

Bei den Vorversuchen dient als Stromquelle eine Influenzmaschine. Diese treibt ein Motor, dem zu seiner Regulierung Glühlampenwiderstände vorgeschaltet sind. Um ein möglichst konstantes Potential zu erhalten, sind dem einen Pol der Maschine zehn Leidener Flaschen parallel gelegt. Bei den Versuchen stellen sich jedoch einige Mängel ein. Erstens ist es äußerst schwierig, infolge der Stromschwankungen im städtischen Leitungsnetz den Motor gleichmäßig laufen zu lassen und dadurch Fehler in der Spannung bis zu 20 Proz.

und mehr zu vermeiden. Zweitens verursacht der öfters eintretende Polwechsel der Maschine unliebsame Störungen. Wie die Beobachtungen ergeben, reichen Spannungen bis zu 3000 Volt für die Untersuchungen vollkommen aus. Weit



Schaltungsschema.

Fig. 3.

bequemer können wir über diese in den beiden Hochspannungsbatterien verfügen. Für die Hauptversuche wird daher die Influenzmaschine durch die Batterien ersetzt. Das Versuchsschema bleibt ungeändert.

§ 4. Beobachtungsmethode.

Der Beobachtungsraum ist während der Dauer der Untersuchungen verdunkelt, um die Zimmertemperatur möglichst konstant zu erhalten (im Laufe eines Tages schwankt sie um 1°) und den Einfluß des Tageslichtes auf den Isolator unschädlich zu machen.

Das Dielektrikum wird mit einem glatten weißen Papier umgeben, aus dem Exsikkator genommen, an die Messingkettchen gehängt und mit der größten Vorsicht in den Versuchsapparat gebracht. Durch Öffnen der beiden Messingplatten R und S kann es genau ausgerichtet werden.

Infolge des sehr schnellen Abklingens der dielektrischen Erregung wird folgende indirekte Methode zu ihrer Messung eingehalten. Zu Beginn eines jeden Versuches wird der Isolator auf Oberflächenladung geprüft. Zeigt das Elektrometer keinen Ausschlag, dann wird er mittels des Haspels in die Mitte des oberen Kondensators gebracht, die halbkreisförmigen Scheiben geschlossen und zu einer bestimmten Zeit, die durch das Auslösen einer Stoppuhr angezeigt wird, mittels eines Paraffinkommutators die Spannung angelegt. Nachdem 3 bzw. 2, 1, $\frac{1}{2}$. oder $\frac{1}{4}$ Minuten verstrichen sind, wird ausgeschaltet und gleichzeitig eine zweite Stoppuhr angelassen, die beiden Scheiben H sofort auseinandergezogen, das Dielektrikum durch den Haspel in den zweiten Kondensator gebracht und nach $\frac{1}{2}$ bzw. 1 Minute die Erdung des einen Quadrantenpaares durch Ziehen an dem Rutherfordschen Schlüssel aufgehoben. Gleichzeitig wird die eine Uhr gestoppt und die andere in Gang gesetzt. Nach einigen Vorversuchen war eine sichere Handfertigkeit angeeignet. Um die Influenz der inneren Elektrode B' zu messen, führt der Haspel den Zylinder in den oberen Kondensator zurück, die beiden halbkreisförmigen Scheiben werden geschlossen und der Ausschlag der Elektrometernadel beobachtet. Nach Verlauf von 3 Minuten, die nötig sind, bis die Nadel sich vollkommen beruhigt hat, wird die Messung in derselben Weise wiederholt.

Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Versuchen wird stets so lange gewartet, daß keine von dem ersten herrührende Nachwirkung während der Ausführung des zweiten zu be-

fürchten ist. Denn wie einige Untersuchungen erkennen lassen, darf diese Vorsicht nicht außer acht gelassen werden. Erstens, werden zwei Messungsreihen kurz nach dem Verlauf der ersten vorgenommen, so stellt sich eine wesentlich andere Nachwirkung ein, als wenn 2—3 Stunden nach dem ersten Versuche verflossen sind. Zweitens laden sich die Zylinder infolge der fortgesetzten dielektrischen Erregung, namentlich wenn sie hohen Potentialen ausgesetzt sind, schwach negativ bis zu einem Ausschlag von 2—4 Skalenteilen auf. Erst nach 1—2 Tagen Ruhe ist die Ladung verschwunden. Wegen dieser zu befolgenden Vorsichtsmaßregeln erfordern die Untersuchungen einen langen Zeitaufwand. Die Kontrollmessungen werden durchschnittlich erst 8 Tage nach dem ersten Versuche vorgenommen; bei allen ergibt sich eine befriedigende Übereinstimmung.

Recht interessant ist es, den Einfluß verschiedenartiger, kurz hintereinander einwirkender elektrischer Felder zu beobachten. Bei einigen Isolatoren sind derartige Versuche angestellt. Wirken z. B. nacheinander ein negatives, dann positives und zuletzt wieder ein negatives Feld derselben Stärke ein, so beobachtet man ein Wandern unserer Elektrometernadel von der einen Seite der Skala nach der anderen und wieder zurück in der Weise, daß sie nach der dem negativen Felde entsprechenden Seite einen Ausschlag anzeigt, dann die Ruhelage überschreitet, nach der anderen Seite ausschlägt und schließlich nach einem zweiten Durchgang durch die Ruhelage wieder in die erste Richtung zurückkehrt und allmählich den Nullpunkt erreicht. Wir begnügen uns mit der Feststellung der Tatsache, ohne genauere Messungen anzustellen.

§ 5. Resultate.

a) Nachwirkungen von Kolophonium, Ebonit, Schellack und Siegellack.

Die Untersuchungen sind mit Spannungen von — 3200, — 2600, — 2120, — 1650, — 980, — 490 Volt ausgeführt. An die innere Elektrode ist der negative Pol der Hochspannungsbatterie angelegt, um die innere Fläche des Isolators positiv zu erregen. Irgendwelche schädliche Einflüsse —

seien es unvorsichtiges Abrollen des Zylinders, was eine negative Aufladung bewirkt, oder durch größere Staubbäseerchen auf den Isolator übertragene Elektrizitätsmengen — fallen dadurch am sichersten ins Auge.

Die Expositionszeiten, während deren die Dielektrika dem elektrischen Felde ausgesetzt sind, betragen 3, 2, 1, $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ Minuten. Für die Expositionszeit 3 Minuten kommen bei unseren Messungen nur — 1650, — 980 und — 490 Volt in Betracht, da der Meßbereich unserer Skala nicht ausreicht, um die durch höhere Spannungen bewirkte dielektrische Erregung zu beobachten. In Tabellen und Kurven sind die Resultate niedergelegt. Hierin bedeuten V die angelegte Spannung, T die Expositionszeit, t gemessene Zeit der Nachwirkung und x der in Zentimetern gemessene Ausschlag der Elektrometernadel. Um Kurven von übersichtlicher Größenordnung zu erhalten, sind nach E. Wiechert auf der Ordinatenachse die Ausschläge x (in Zentimeter) in der gebräuchlichen Form eingetragen, während der Abszissenachse solche t -Werte (in Minuten) entsprechen, die in geometrischer Progression anwachsen.

Wegen der Nachwirkungskurven und Tabellen von Kolophonium, Ebonit und Schellack sei auf die Dissertation¹⁾ verwiesen. In aller Kürze geben wir im folgenden die Resultate.

Die Nachwirkungskurven des Kolophoniums klingen außerordentlich schnell ab. Nach 3 Stunden beobachten wir sowohl bei einer Expositionszeit von 3 Minuten und einer Spannung von — 1620 Volt als auch bei einer solchen von 2 Minuten und — 3150 Volt keinen erheblichen Ausschlag. Bei kleinen Expositionszeiten T und Spannungen V erreichen wir nach kurzer Zeit den Nullpunkt; z. B. für $T = \frac{1}{4}$ Minute und $V = -490$ Volt ist nach $t = 13$ Minuten die Nachwirkung zu Ende.

Ein ähnliches Verhalten zeigt Ebonit. Die dielektrische Erregung ist etwas größer als die des Kolophoniums, jedoch erfolgt das Abklingen der Nachwirkung bei $T = 3$ Minuten und $V = -1670$ Volt schon nach 5 Stunden, bei $T = 2$ Minuten und $V = -3210$ Volt allerdings erst nach zirka 9 Stunden.

1) E. Schreiber, l. c.

Bei kleinem V und T geht auch hier der Effekt sehr schnell zurück, und wir erreichen bei $V = -490$ Volt und $T = \frac{1}{4}$ Minute bereits nach 16 Minuten die Ruhelage.

Ein von den beiden ersten Materialien abweichendes Verhalten zeigen Schellack und Siegellack. Zunächst ist bei Schellack ein außerordentlich weitgehender Unterschied zu finden. Eine Expositionszeit von 3 Minuten und eine Spannung von -1620 Volt bewirkt eine Erregung, die erst nach 34 Stunden keinen Ausschlag der Nadel mehr erkennen läßt, während bei kleinem T und V schon nach $\frac{1}{2}$ Stunde jede Nachwirkung aufhört. Welche Erregung eine sehr lange Expositionszeit von $T = 1$ Stunde und $V = -3210$ Volt auslöst, zeigt folgender Versuch. Nach 5 Tagen ist der Ausschlag bis auf 2 Skalenteile vom Nullpunkt zurückgegangen.

Bei Siegellack stellt sich ein geringerer Effekt ein als bei Schellack. Im folgenden sind die Kurven und Tabellen für diesen Isolator gegeben, da wir die Werte im Anhang bei Anwendung der Wiechertschen Theorie teilweise wieder benutzen.

Siegellack.

$V = -1630$ Volt. $T = 3$ Min.

x	t	x	t
—	0 ^m 30 ^s	8,44	26 ^m 22,8 ^s
—	1 0	7,46	29 37,1
78,97	2 0	6,68	32 43,5
44,23	3 34,4	6,02	38 0
41,96	3 42,7	4,81	48 5,0
36,32	4 24,0	3,94	58 25,4
31,97	5 21,6	3,23	74 30,2
27,53	6 48,0	2,64	95 34,1
24,58	7 26,4	2,06	115 21,3
22,09	8 19,2	1,81	132 37,3
20,48	9 31,2	1,22	188 47,1
19,74	10 6,2	0,64	255 51,4
17,2	11 50,4	0,36	318 0,7
15,25	13 28,6	0,25	386 45,8
12,48	16 41,7	0,13	443 4,7
10,88	19 55,5	0,08	470 19,3
9,74	23 3,9	0,01	517 10,2

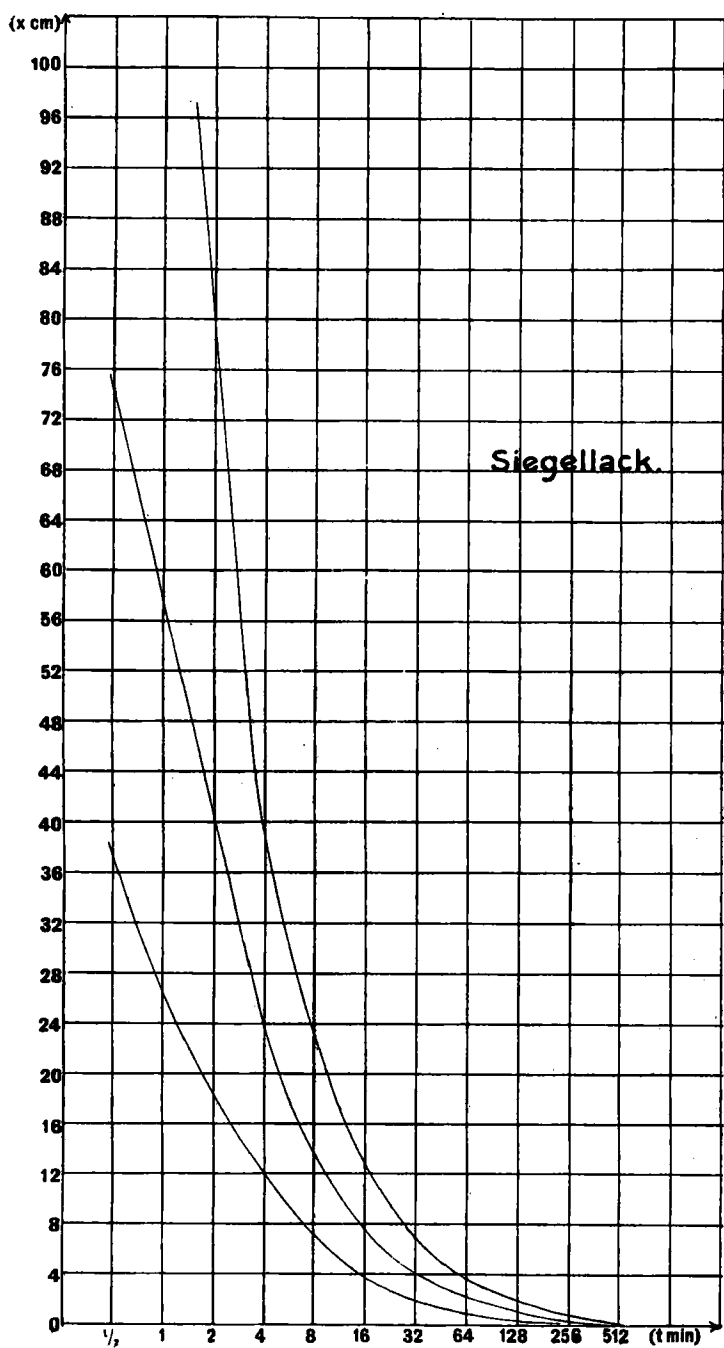


Fig. 4.

Siegellack.

x	t	x	t	x	t
$V = -980 \text{ V. } T = 3 \text{ Min.}$					
74,2	0 ^m 30,0 ^s	7,34	7 ^m 33,5 ^s	10,54	30 ^m 0,7 ^s
57,24	1 0	6,66	8 33,6	9,46	33 8,8
39,8	2 2,4	6,27	9 21,6	8,75	36 39,9
23,96	3 57,4	5,52	10 57,3	8,06	40 31,0
20,98	4 48,0	4,17	14 19,2	6,8	48 57,3
18,95	5 28,8	3,4	17 57,1	6,58	50 37,4
16,99	6 16,8	2,87	21 51,0	5,85	55 14,9
14,16	7 34,8	2,48	25 2,0	5,01	61 45,7
12,72	8 43,2	2,22	28 6,6	3,98	76 29,3
11,96	9 40,8	1,93	31 34,9	3,52	87 40,8
11,04	10 39,8	1,72	35 8,5	3,35	94 6,3
8,62	14 9,5	1,36	45 29,6	2,44	117 13,0
7,01	17 31,9	1,06	55 36,9	2,04	139 29,0
6,11	20 49,3	0,76	70 57,7	1,58	169 43,8
5,27	24 9,0	0,57	86 0,6	1,28	208 50,2
4,61	27 29,6	0,49	95 11,9	0,74	277 32,6
4,16	30 52,0	0,38	116 11,8	0,6	308 55,6
3,76	34 21,3	0,13	158 21,6	0,4	375 5,0
3,33	39 40,4	0,09	178 17,6	0,16	448 5,8
3,08	45 4,7	0,02	224 18,1	0,1	508 22,7
2,64	53 35,5			0,03	556 27,4
2,24	63 57,5	$V = -3220 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$			
1,84	74 23,0	—	0 ^m 30,0 ^s	$V = -2630 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$	
1,68	82 19,4	—	1 0	—	0 ^m 30,0 ^s
1,2	104 51,1	82,8	2 1,2	96,33	1 0
0,88	143 17,2	61,65	3 39,7	69,4	2 3,6
0,51	204 40,2	58,67	3 56,0	46,66	3 55,2
0,17	292 58,8	54,88	4 24,0	41,34	4 33,6
0,04	354 39,1	47,08	5 36,0	37,89	5 7,4
0,01	414 52,1	41,71	6 26,4	31,9	6 24,0
		36,32	7 12,3	25,83	7 49,5
		31,4	8 14,4	23,8	8 43,2
		28,84	9 21,6	23,46	9 5,0
$V = -480 \text{ V. } T = 3 \text{ Min.}$					
37,18	0 ^m 30,0 ^s	26,73	10 22,5	20,87	10 28,8
26,17	1 0	24,02	11 55,2	19,43	11 22,0
17,92	2 3,6	21,05	13 46,3	17,77	12 38,3
14,28	3 12,0	16,95	17 7,8	14,82	14 57,1
11,84	4 2,4	15,02	20 26,1	13,37	16 35,1
10,24	5 14,4	13,39	23 44,7	12,41	18 42,6
9,16	6 4,8	11,95	26 45,5	10,71	22 16,9

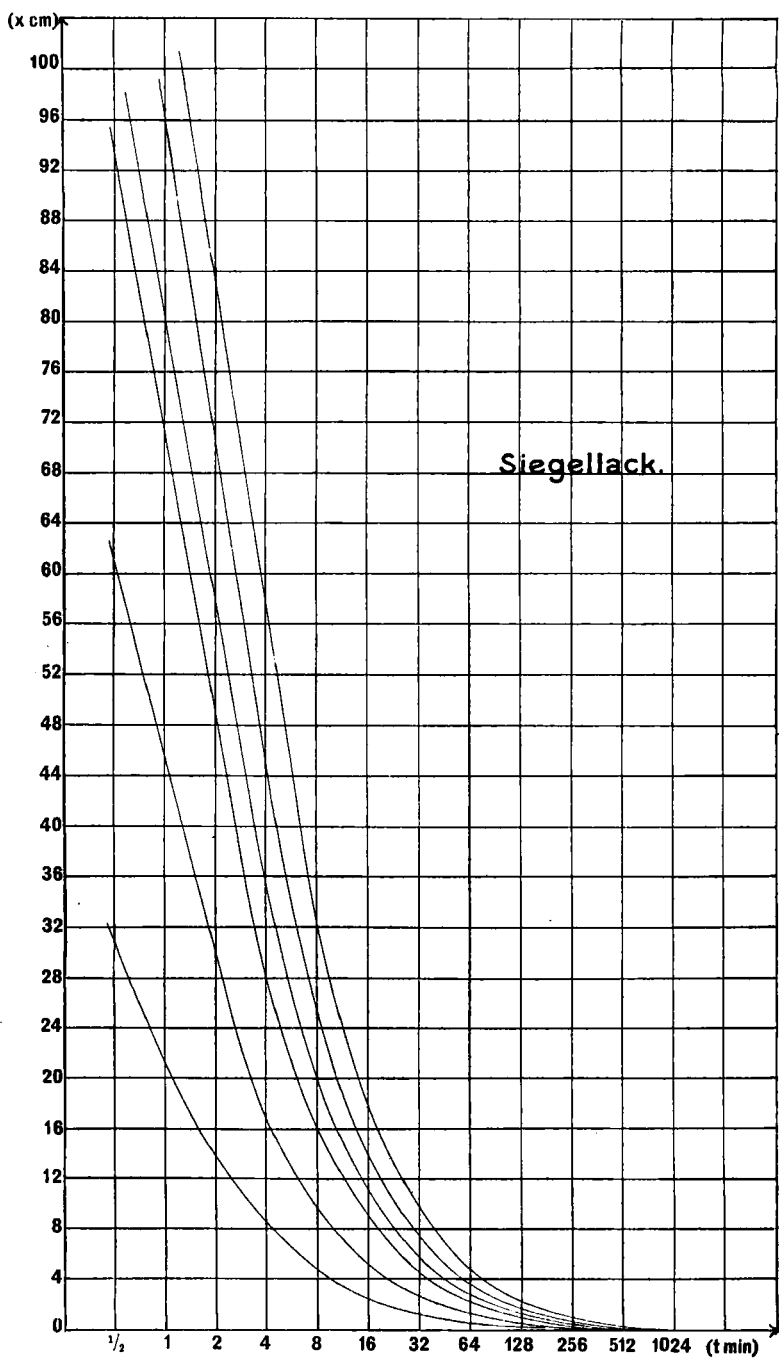


Fig. 5.

Siegelack.

x	t	x	t	x	t
$V = -2630 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$					
9,42	25 ^m 41,2 ^s	3,66	51 ^m 9,2 ^s	1,08	115 ^m 21,9 ^s
7,89	30 27,6	3,03	59 3,3	0,92	125 5,2
7,14	33 40,6	2,51	69 25,3	0,7	155 11,5
6,27	38 15,4	2,16	79 50,7	0,44	201 17,0
5,9	42 3,5	1,67	95 54,5	0,31	252 24,3
4,66	51 29,8	1,37	111 36,7	0,17	282 38,3
3,6	62 39,9	1,02	129 45,7	0,01	362 28,4
3,03	75 36,2	0,77	160 15,2		
2,2	99 50,5	0,43	211 51,0	$V = -980 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$	
1,88	118 27,4	0,19	257 43,0	61,1	0 ^m 30,0 ^s
1,2	160 37,5	0,2	296 43,5	45,46	1 0
0,97	181 50,2	0,08	369 4,9	23,56	2 12,0
0,73	226 25,5	0,05	448 46,4	17,55	3 54,8
0,41	279 5,8	$V = -1630 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$		15,41	4 33,6
0,24	340 19,3	93,76	0 ^m 30,0 ^s	13,86	5 19,2
0,12	403 3,5	70,94	1 0	11,92	6 24,0
0,04	465 2,9	48,1	2 1,2	10,49	7 19,3
$V = -2130 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$		32,11	3 27,1	9,2	8 14,4
—	0 ^m 30,0 ^s	26,79	4 9,6	8,56	9 16,8
80,96	1 0	23,28	5 12,0	7,56	10 43,0
56,82	2 2,4	18,62	6 55,3	7,39	11 8,4
41,74	3 22,9	17,95	7 8,1	5,84	14 22,8
33,56	4 26,4	15,33	8 28,8	4,73	18 0,6
28,35	5 28,8	14,2	9 31,2	3,91	21 41,2
24,19	6 48,2	12,91	10 34,4	3,46	25 0,2
21,38	7 33,6	10,44	13 39,8	2,95	28 44,7
18,92	8 38,4	8,4	17 23,0	2,53	32 14,9
17,84	9 31,2	7,28	20 47,7	2,38	35 35,6
16,75	10 22,0	6,18	24 25,2	1,99	41 20,8
13,1	13 41,4	5,43	27 46,5	1,52	53 52,2
10,49	17 6,3	4,75	31 8,7	1,21	64 42,2
9,13	20 24,2	4,24	34 35,4	1,05	75 11,1
7,9	23 45,4	3,76	40 0	0,88	85 47,4
6,81	27 24,7	3,27	45 15,3	0,8	91 30,0
5,91	30 51,5	2,96	50 40,7	0,64	102 55,6
5,39	34 24,3	2,35	61 5,7	0,4	133 34,0
4,66	39 40,7	1,99	71 40,9	0,21	182 20,3
4,12	44 43,7	1,57	88 47,2	0,09	227 40,6
		1,38	93 44,6	0,01	294 5,7

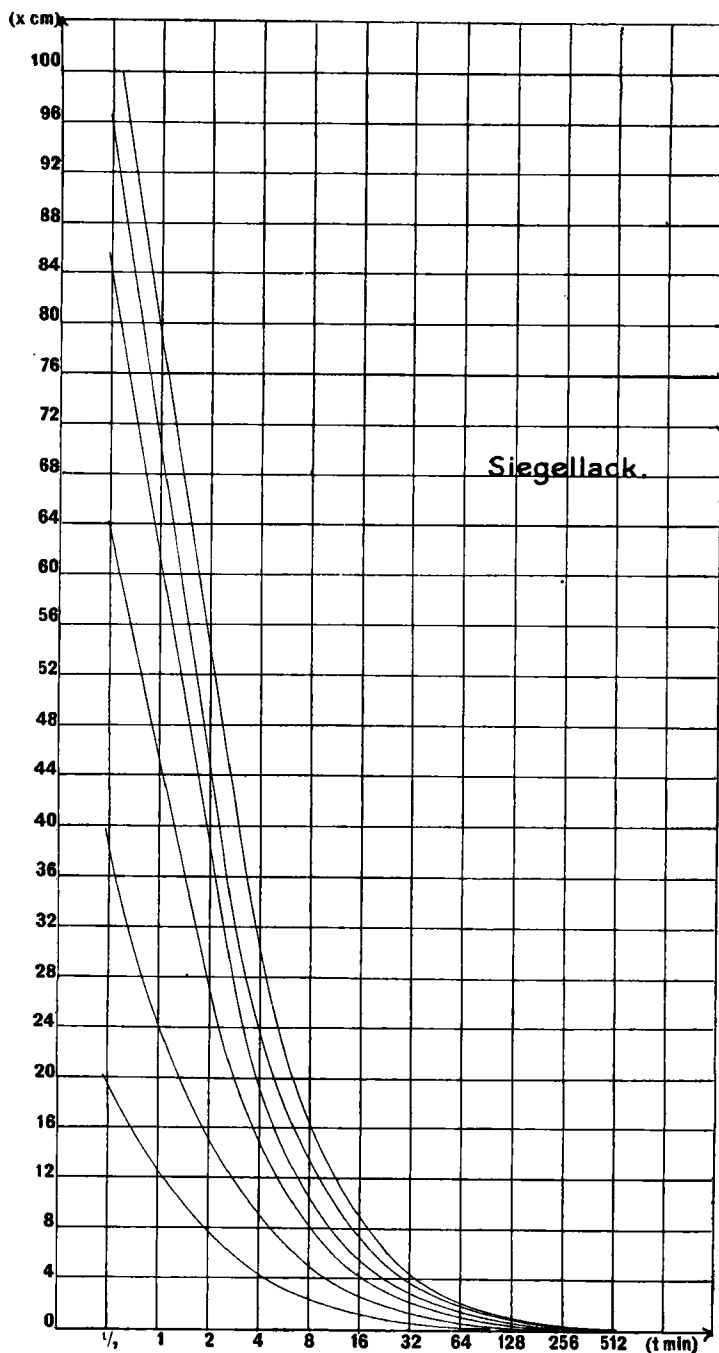


Fig. 6.

Siegellack.

x	t	x	t	x	t
$V = -470 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$					
31,03	0 ^m 30,0 ^s	13,71	10 ^m 8,5 ^s	4,67	24 ^m 48,5 ^s
21,0	1 0	10,67	13 25,1	4,1	28 7,3
13,48	2 1,2	9,52	14 35,0	3,62	31 28,5
9,05	3 44,9	7,74	18 2,2	3,28	35 1,4
8,55	4 0,7	6,63	21 25,3	2,78	40 25,5
7,12	5 16,8	5,81	24 46,7	2,48	47 3,5
5,81	6 40,8	5,04	28 3,3	2,17	52 21,3
5,24	7 19,5	4,28	31 29,3	1,84	59 46,5
4,48	8 38,4	3,99	34 50,5	1,62	67 31,8
4,12	9 31,2	3,39	41 15,6	1,33	81 3,1
3,87	10 43,2	2,97	47 18,8	1,07	94 46,4
3,68	11 1,5	2,51	53 17,0	0,93	110 35,3
2,84	14 19,5	2,29	58 58,8	0,5	143 25,3
2,29	17 48,0	2,0	67 38,8	0,29	197 12,3
2,01	21 18,5	1,66	78 7,8	0,15	242 12,0
1,62	24 43,4	1,32	94 58,3	0,06	304 11,2
1,43	28 25,2	1,1	111 31,4	$V = -2120 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$	
1,25	31 52,2	0,8	128 59,1	84,04	0 ^m 30,0 ^s
1,01	35 32,7	0,6	181 11,1	61,13	1 0
0,9	40 48,8	0,39	243 32,6	36,83	2 6,0
0,74	49 5,0	0,3	289 23,1	19,77	3 52,0
0,47	62 24,0	0,2	350 59,3	18,75	4 4,3
0,32	70 34,1	0,13	413 24,8	15,3	5 24,0
0,25	86 21,5	0,01	474 28,8	13,16	6 26,4
0,11	100 17,1	$V = -2630 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$		10,82	7 37,8
0,07	118 20,9	95,31	0 ^m 30,0 ^s	10,0	8 19,2
0,01	148 37,7	69,92	1 0	9,11	9 31,2
$V = -3220 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$		45,04	2 0	8,35	10 43,7
—	0 ^m 30,0 ^s	25,56	3 42,4	6,24	13 59,6
78,64	1 0	22,98	4 4,3	5,73	15 10,6
52,88	2 1,2	19,44	5 12,0	4,61	19 3,0
32,23	3 44,1	16,46	6 16,8	3,92	22 28,2
29,29	4 7,9	13,96	7 32,7	3,31	26 1,4
24,4	5 21,6	12,4	8 33,6	3,0	29 20,5
19,49	6 49,3	11,65	9 21,6	2,57	32 22,6
16,96	7 42,2	10,38	10 41,1	2,41	35 35,9
15,34	8 38,4	8,2	14 4,3	2,19	42 14,9
14,32	9 31,2	6,67	17 36,3	2,0	47 36,1
		5,36	21 33,9	1,8	52 41,5

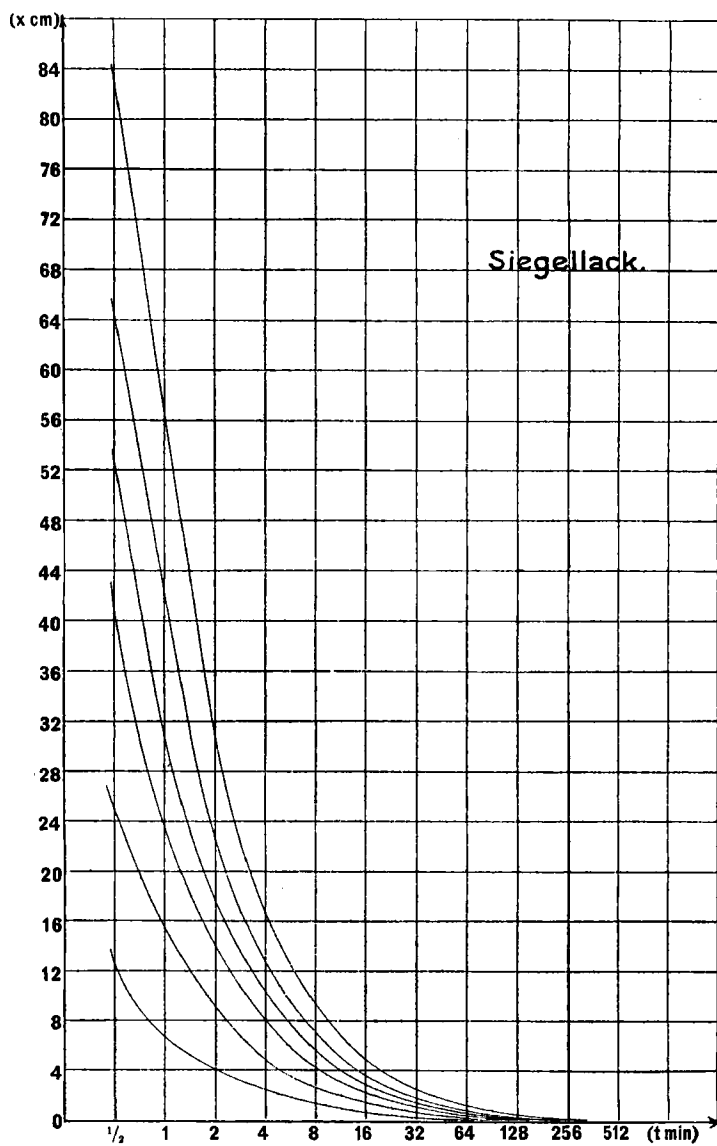


Fig. 7.

Siegellack.

x	t	x	t	x	t
$V = -2120 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$		$V = -980 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$			
1,52	59 ^m 53,2 ^s	38,44	0 ^m 30,0 ^s	2,1	8 ^m 33,8 ^s
1,22	66 37,1	24,01	1 0	1,94	9 53,6
0,95	82 55,5	14,44	2 7,2	1,79	10 57,6
0,76	100 2,8	9,38	3 49,0	1,44	12 12,2
0,57	115 44,4	8,61	4 6,7	1,18	15 27,0
0,38	136 51,8	7,11	5 33,6	0,97	18 54,5
0,17	184 17,1	5,67	6 56,2	0,77	23 13,0
0,03	239 31,2	4,95	7 43,3	0,58	26 51,4
		4,51	8 43,2	0,5	30 25,5
		4,12	9 36,0	0,42	33 47,2
		3,95	10 14,4	0,34	36 49,5
63,42	0 ^m 30,0 ^s	3,56	11 33,2	0,31	42 34,1
45,0	1 0	2,64	14 54,1	0,15	53 2,8
25,24	2 10,8	2,24	18 17,2	0,11	63 50,4
15,64	3 44,8	1,87	21 56,6	0,08	85 9,9
13,88	4 19,2	1,56	25 18,2	0,02	92 4,3
11,96	5 21,6	1,39	28 38,5	$V = -3240 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$	
10,08	6 28,8	1,12	32 30,3	82,8	0 ^m 30,0 ^s
8,34	7 39,8	1,08	36 22,5	56,25	1 0
7,76	8 14,4	0,84	41 47,0	29,24	2 3,6
7,04	9 26,4	0,7	49 28,3	16,96	3 53,0
6,01	10 56,1	0,54	54 59,0	15,14	4 34,3
4,72	14 17,3	0,46	60 45,0	13,2	5 31,2
3,85	17 31,7	0,45	68 19,6	11,68	6 24,0
3,33	20 55,6	0,28	82 33,6	9,75	7 35,9
2,79	24 37,6	0,16	99 12,0	8,8	8 32,8
2,38	28 33,3	0,09	113 53,8	8,04	9 36,0
2,14	31 58,5	0,03	134 50,9	7,64	10 19,2
1,84	35 45,1	0,01	182 29,5	6,77	11 49,4
1,58	41 34,3			5,13	15 1,5
1,41	47 21,3	$V = -480 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$		4,54	17 6,0
1,17	55 32,2	19,29	0 ^m 30,0 ^s	3,99	20 10,7
0,9	63 29,2	12,48	1 0	3,27	24 28,1
0,8	72 43,5	7,51	2 0	2,75	28 20,2
0,61	88 9,2	4,75	3 35,5	2,51	31 34,5
0,49	105 12,6	3,96	4 22,2	2,02	38 26,5
0,32	142 49,0	3,36	5 16,8	1,96	41 42,6
0,18	158 33,6	2,76	6 43,0	1,84	47 5,6
0,11	170 14,4	2,28	7 38,4	1,52	52 33,3
0,08	193 16,8			1,14	63 8,6

Siegellack.

x	t	x	t	x	t
$V = -3240 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$		0,19	156 ^m 48,6 ^s	6,61	5 ^m 7,2 ^s
1,07	74 ^m 52,8 ^s	0,11	220 41,1	4,96	6 52,7
0,92	79 21,6	0,04	262 7,4	4,81	7 10,2
0,78	88 12,0	$V = -2120 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$		3,97	8 24,0
0,69	105 31,9	53,07	0 ^m 30,0 ^s	3,6	9 31,2
0,36	138 6,9	30,52	1 0	3,31	10 34,7
0,27	170 50,1	16,9	2 6,0	2,55	14 11,5
0,15	201 5,4	10,97	3 43,9	2,1	17 49,1
0,07	262 45,6	9,73	4 16,8	1,7	21 23,0
0,01	337 2,8	8,39	5 16,8	1,52	24 51,0
$V = -2630 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$		6,4	6 52,0	1,22	28 24,1
64,39	0 ^m 30,0 ^s	5,99	7 24,0	1,12	31 34,8
41,4	1 0	5,16	8 33,6	1,01	35 26,2
22,4	2 1,2	4,76	9 31,2	0,87	40 51,6
13,16	3 56,3	4,66	10 3,6	0,79	46 27,6
12,25	4 14,4	3,5	13 6,7	0,66	52 12,4
10,68	5 12,0	2,75	16 4,1	0,57	58 13,6
9,07	6 19,2	2,41	19 29,5	0,46	64 35,8
7,65	7 25,5	2,11	23 1,9	0,31	95 56,1
6,66	8 28,8	1,83	26 45,0	0,25	118 46,7
6,16	9 26,4	1,47	31 6,7	0,13	158 51,1
5,72	10 19,2	1,26	34 45,5	0,04	202 23,1
5,34	11 14,3	0,88	44 23,5	$V = -980 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$	
3,96	14 42,9	0,78	51 49,2	24,84	0 ^m 30,0 ^s
3,26	18 22,2	0,71	59 17,1	14,84	1 0
2,68	21 44,5	0,63	68 35,2	8,4	2 7,2
2,37	25 17,6	0,52	75 53,1	5,15	3 42,1
2,07	28 46,0	0,4	96 24,2	4,55	4 14,4
1,84	32 11,4	0,38	107 26,9	3,72	5 26,4
1,72	35 48,7	0,22	122 31,9	2,87	6 57,0
1,46	39 25,9	0,16	154 4,5	2,63	7 38,4
1,34	44 55,5	0,1	186 11,3	2,41	8 19,2
1,22	50 35,1	0,02	220 56,2	2,24	9 12,0
0,96	56 14,9	$V = -1630 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$		2,05	10 4,4
0,81	62 5,7	40,65	0 ^m 30,0 ^s	1,56	13 15,5
0,79	67 53,4	23,2	1 0	1,24	16 50,4
0,5	91 11,8	13,48	2 3,6	1,01	20 39,8
0,48	106 52,5	8,71	3 38,5	0,93	23 51,0
0,35	122 34,1	7,49	4 16,8	0,76	27 26,5
				0,52	35 56,4

Siegellack.

x	t	x	t	x	t
$V = -980 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$		5,28	7 ^m 5,2 ^s	0,72	36 ^m 47,9 ^s
0,44	41 ^m 56,2 ^s	4,32	8 33,6	0,69	42 42,5
0,36	50 31,0	4,09	9 16,8	0,61	49 25,1
0,25	60 55,6	3,56	10 23,1	0,49	57 12,4
0,13	72 57,6	2,94	13 53,6	0,39	63 23,6
0,09	99 37,2	2,35	16 59,4	0,33	70 6,7
0,02	116 23,3	2,0	20 28,6	0,23	90 43,7
		1,73	23 44,3	0,04	136 49,3
$V = -480 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$		1,55	27 21,0	$V = -2120 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$	
12,05	0 ^m 30,0 ^s	1,3	30 59,6	31,02	0 ^m 30,0 ^s
6,36	1 0	1,16	34 59,4	17,27	1 0
3,68	2 10,8	1,03	40 20,8	9,35	2 3,6
2,38	3 46,2	0,85	45 33,7	5,8	3 47,2
2,05	4 33,6	0,66	52 29,9	4,86	4 36,0
1,88	5 14,4	0,57	58 15,0	4,04	5 38,4
1,37	6 50,5	0,5	64 3,1	3,27	6 57,4
1,32	7 19,2	0,41	72 36,1	2,95	7 45,6
1,12	8 38,4	0,31	86 24,0	2,64	8 48,0
1,0	9 40,8	0,28	94 16,7	2,39	9 53,5
0,95	10 53,3	0,21	108 27,0	2,28	10 57,6
0,65	13 59,9	0,19	126 48,3	1,84	13 4,6
0,54	19 2,4	0,12	146 50,3	1,41	16 53,9
0,46	22 4,6	$V = -2630 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$		1,25	20 18,9
0,33	25 29,2	39,14	0 ^m 30,0 ^s	1,06	23 33,8
0,31	27 58,7	20,9	1 0	0,95	27 6,3
0,23	31 34,3	11,51	2 10,8	0,79	32 3,7
0,2	35 23,2	7,63	3 36,3	0,68	38 29,8
0,09	41 15,6	6,11	4 31,2	0,41	49 40,8
0,05	46 44,2	5,43	5 19,2	0,3	64 34,4
0,03	52 8,0	4,68	6 14,4	0,25	75 51,3
0,01	61 29,8	3,99	7 7,2	0,09	106 21,9
$V = -3240 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$		3,4	8 28,8	$V = -1630 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$	
48,65	0 ^m 30,0 ^s	3,16	9 26,4	24,75	0 ^m 30,0 ^s
25,53	1 0	2,95	10 27,7	14,44	1 0
15,04	2 0	2,3	13 35,2	7,84	2 13,2
8,93	3 52,1	1,65	18 26,0	4,61	3 49,1
8,2	4 45,6	1,45	22 0,4	4,25	4 6,1
6,65	5 43,2	1,24	25 19,4	3,47	5 19,2
6,04	6 21,6	1,04	29 5,6	2,84	6 38,4
		0,8	32 48,1		

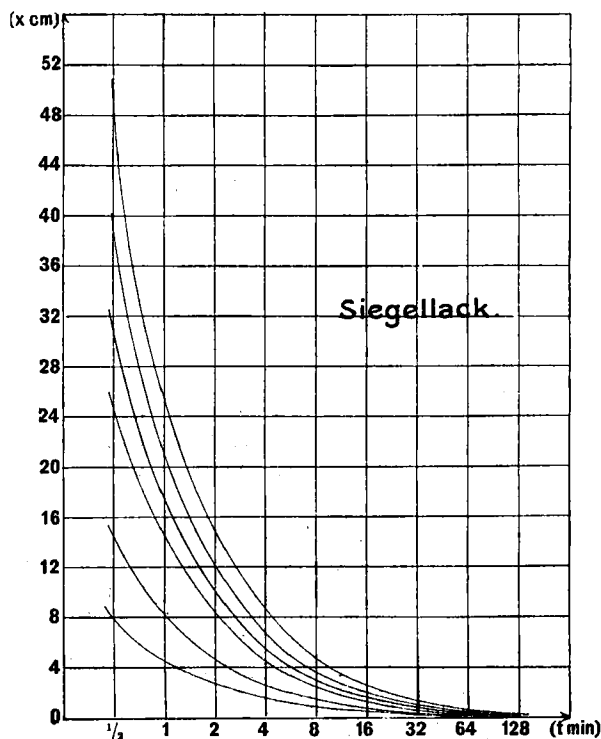


Fig. 8.

Siegellack.

x	t	x	t	x	t
$V = -1630 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$		0,58	32 ^m 49,0 ^s	$V = -980 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$	
		0,47	35 53,7		
2,47	7 ^m 26,3 ^s	0,42	39 24,7	14,37	0 ^m 30,0 ^s
2,28	8 33,6	0,39	45 14,2	8,02	1 0
2,01	9 26,4	0,31	52 23,2	4,28	2 4,8
1,76	10 44,5	0,24	62 48,0	2,77	3 54,4
1,25	14 5,2	0,16	79 21,6	2,24	4 45,6
1,02	17 33,0	0,08	91 31,2	1,9	5 31,2
0,92	21 1,6	0,04	129 16,8	1,68	6 21,6
0,68	27 31,3	0,01	150 43,7	1,56	7 18,9

Siegellack.

x	t	x	t	x	t
$V = -980 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$		0,16	$50^m \ 1,8^s$	0,85	$7^m \ 10,4^s$
1,29	$8^m \ 33,6^s$	0,09	$65 \ 56,4$	0,72	$8 \ 38,4$
1,16	$9 \ 40,8$	0,03	$76 \ 41,5$	0,69	$9 \ 26,4$
0,99	$10 \ 51,0$	$V = -480 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$		0,53	$10 \ 14,6$
0,76	$13 \ 56,9$			0,4	$13 \ 34,2$
0,53	$17 \ 48,1$	7,73	$0^m \ 30,0^s$	0,38	$16 \ 47,8$
0,49	$20 \ 47,9$	4,38	$1 \ 0$	0,35	$19 \ 57,3$
0,39	$24 \ 11,1$	2,52	$2 \ 6,0$	0,28	$23 \ 47,4$
0,35	$27 \ 19,5$	1,43	$3 \ 55,0$	0,2	$28 \ 50,1$
0,3	$30 \ 27,7$	1,28	$4 \ 28,8$	0,12	$34 \ 6,3$
0,25	$33 \ 47,4$	1,08	$5 \ 38,4$	0,07	$39 \ 2,8$
0,21	$40 \ 24,7$	0,93	$6 \ 40,8$	0,04	$48 \ 9,7$

Eine Expositionszeit von 3 Min. und eine Spannung von -1630 Volt löst eine 9stündige Nachwirkung aus. Bei kleinem T und V verschwindet bereits nach $\frac{3}{4}$ Stunden die Erregung.

Überraschend wirkt die Tatsache, daß bei $T = \frac{1}{4}$ Min. und $V = -490$ Volt bei allen Isolatoren nach $t = 30$ Sek. ungefähr dieselbe Erregung beobachtet wird, und die Nachwirkungskurven fast in derselben Weise verlaufen. Alle untersuchten Dielektrika lassen die Gesetzmäßigkeit erkennen, die aussagt, daß für sehr kleine T und V der Verlauf der Nachwirkung der gleiche ist.

Für größere V und T zeigen die vier Isolatoren ein unter sich vollkommen verschiedenes Verhalten. Öfters können wir beobachten, daß bei demselben T und V nach $t = 30$ Sek. dieselbe dielektrische Erregung statthat, daß aber die Nachwirkungskurve der einzelnen Dielektrika vollkommen verschieden ist. Die gezeichneten Kurven weisen alle auf einen ganz regelmäßigen Verlauf der Nachwirkung hin. Sie wächst mit der Dauer und Stärke des elektrischen Feldes. Bei den meisten Beobachtungen nimmt sie während der ersten 10 Min. sehr schnell linear ab, um dann später der t -Achse ihre konvexe Seite zuzukehren und langsam asymptotisch zu verlaufen. Die Geschwindigkeit, mit der wir uns der Ruhelage nähern,

wird mit wachsender Größe und Dauer des elektrischen Feldes kleiner.

Die Größe der Nachwirkung kann bei der getroffenen Versuchsanordnung für $t = 0$ nicht beobachtet werden. Es bleibt daher die recht interessante Frage offen, ob die Verlängerung unserer Kurven bis zum Schnittpunkt mit der Ordinatenachse den wirklichen Verlauf darstellt. Wie z. B. die Nachwirkungskurven von Paraffin und Schwefel lehren, scheint bei allen Isolatoren nach Aufhebung des erregenden elektrischen Feldes ein Wendepunkt aufzutreten, so daß das erste Stück der Nachwirkungskurve seine konkave Seite der t -Achse zuwendet.

b) Nachwirkungen von Paraffin und Schwefel.

Die Untersuchung von Paraffin und Schwefel bietet insofern hohes Interesse, weil immer noch die Frage strittig ist, ob beide Isolatoren eine Nachwirkung zeigen. Mit dieser Aufgabe beschäftigen sich die Arbeiten von C. Dieterici¹⁾, L. Arons²⁾, H. Muraoka³⁾, Hasenöhl⁴⁾. Nachdem Maxwell⁵⁾ seine Theorie über das geschichtete Dielektrikum ausgebaut hatte, versuchten diese Autoren ihre Beobachtungen mit den theoretischen Folgerungen Maxwells in Einklang zu bringen. Diese Theorie, nach der im homogenen Dielektrikum kein Rückstand auftritt, ist durch Rowland und Nichols⁶⁾ für Kalkspat, durch Hertz⁷⁾ für Benzin, durch Arons, Muraoka und Hasenöhl für Paraffin bestätigt. Wenn auch die Untersuchungsmethode der Rückstandsbildung prinzipiell von der unsrigen abweicht — denn bei den älteren Messungen ist das Dielektrikum meistens mit dem Kondensator fest verbunden — und dadurch weit kompliziertere Verhältnisse auftreten als bei unserer Versuchsanordnung, so läßt

1) C. Dieterici, Wied. Ann. 25. p. 545. 1885.

2) L. Arons, Wied. Ann. 35. p. 291. 1888.

3) H. Muraoka, Wied. Ann. 40. p. 328. 1890.

4) F. Hasenöhl, Wiener Ber. 107. p. 1035. 1898.

5) J. C. Maxwell, Elektrizität und Magnetismus p. 468. 1883. Deutsche Ausgabe.

6) H. A. Rowland u. E. F. Nichols, Phil. Mag. (5) 11. p. 414. 1881.

7) H. Hertz, Wied. Ann. 20. p. 279. 1883.

doch der ähnliche Verlauf des Rückstandes Schlüsse zu, die sich mit unseren Beobachtungen decken.

Unsere Messungen zeigen eine deutliche Nachwirkung des Paraffins. Im Maxwell'schen Sinne haben wir eine solche zu erwarten, denn ein Rückstand muß auftreten, wenn in dem untersuchten Körper das Verhältnis von Dielektrizitätskonstante und Leitungsvermögen oder die diesem Verhältnis proportionale Relaxationszeit nicht überall den gleichen Wert hat. Bei unseren Versuchen haben wir zwischen den Elektroden des Kondensators eine Diskontinuitätsfläche, d. h. Trennungsfläche zweier verschiedener Dielektrika, nämlich Luft und Paraffin, mit verschiedenen Relaxationszeiten eingebettet, so daß für diesen Fall eine Erklärung des Phänomens gegeben ist. Eine andere Frage ist es, ob auch r von ∞ verschieden ist. Ehe wir dies an der Hand unserer Versuche besprechen wollen, lassen wir ältere Beobachtungen folgen. Arons führte Messungen mit einem Paraffinkondensator aus, der vollkommen rückstandsfrei war. Die Prüfung auf Isolation des ganzen Systems erwies sich als vorzüglich. Infolge der außerordentlichen Isolierfähigkeit nimmt er daher an, daß in einem Kondensator, dessen Dielektrikum aus einer Schicht Paraffin und einer Luftschicht besteht, kein Rückstand auftreten kann. Seine Versuche bestätigen diese Vermutung. Ähnliche Messungen Hasenöhrls mit einem Paraffinkondensator mit und ohne Luftschicht ergaben keinen Rückstand.

Eine Prüfung auf Leitvermögen des benutzten Paraffinzyinders gestattet unsere Versuchsanordnung nicht. Allerdings sind andere Zylinder derselben Substanz und Form auf Isolation geprüft, indem ihre inneren Flächen mit einer Elektrode, die in ein Blättchenelektrometer eingesteckt ist, fest verbunden werden, während die äußeren Flächen eine direkte Ableitung zur Erde haben. Das Elektrometer zeigt keinen Spannungsverlust durch mangelhafte Isolation des benutzten Materiales, so daß nach den Beobachtungen von Arons und Hasenöhrl unser Paraffin hätte rückstandsfrei sein müssen.

Eine zweite Möglichkeit, den Rückstand zu erklären, bietet ein Versuch von Arons. In einer Arbeit von Dietrici über den zeitlichen Verlauf der elektrischen Rückstandsbildung im Paraffin zeigt Paraffin einen bedeutenden Rück-

stand. Arons führt diese Beobachtung auf große Verunreinigung der Substanz zurück, was er bestätigt fand. Mit der größten Sorgfalt wurde daher unser Material nach einer von Hasenöhr¹⁾ gegebenen Methode gereinigt, so daß auch die zweite Erklärung für die Nachwirkung bei Paraffin hinfällig ist.

Vielleicht gewähren die Versuchsbedingungen einen Aufschluß über das beobachtete Phänomen. Alle älteren Arbeiten sind mit Spannungen von durchschnittlich nur 200 Volt ausgeführt, während bei unseren Messungen auf Paraffin eine Spannung von -1650 Volt einwirkt. Kleinere Spannungen von -490 Volt bei einer Expositionszeit von $\frac{1}{4}$ Min. lösen eine Erregung von nur 1,1 Skt. aus, so daß die Wahrscheinlichkeit nahe liegt, daß bei noch geringeren Spannungen kaum ein Ausschlag zu beobachten ist. Wir dürfen daher

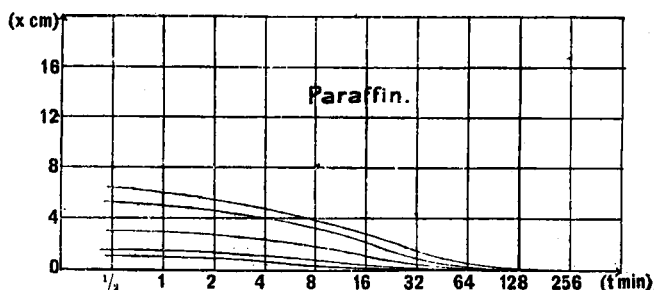


Fig. 9.

die Nachwirkung des Paraffins der Einwirkung des hohen Potentials zuschreiben. Bei höheren Spannungen und längeren Expositionszeiten bis zu 3 und 2 Min. scheint sich die Erregung einer Grenze zu nähern, denn bei $V = -1630$ Volt und $T = 3$ Min. haben wir für $t = 30$ Sek. $x = 6,47$ und für $V = -3210$ Volt und $T = 2$ Min. nur 7,56 Skt. Ausschlag, also nur ganz geringe Differenzen, während die anderen Dielektrika in diesem Bereiche bedeutende Unterschiede aufweisen.

1) F. Hasenöhr, l. c.

Paraffin.

x	t	x	t	x	t
$V = -1630 \text{ V. } T = 3 \text{ Min.}$		3,32	7 ^m 38,4 ^s	$V = -1630 \text{ V. } T = 1\frac{1}{2} \text{ Min.}$	
		3,12	8 48,0	1,51	0 ^m 30 ^s
6,47	0 ^m 30,0 ^s	3,04	9 40,8	1,43	1 0
6,04	1 0	2,89	10 23,7	1,24	2 8,4
5,43	2 8,4	2,39	13 57,1	1,02	3 28,5
5,01	3 24,4	1,91	18 44,4	0,92	4 21,6
4,68	4 16,8	1,6	22 16,1	0,87	5 16,8
4,45	5 19,2	1,23	25 34,3	0,81	6 19,2
4,09	6 34,7	1,04	28 54,3	0,77	7 37,3
4,0	7 14,4	0,91	32 23,6	0,68	8 24,0
3,77	8 33,6	0,7	35 57,7	0,55	9 55,8
3,59	9 48,0	0,5	42 43,1	0,49	10 37,9
3,43	10 52,8	0,31	53 11,5	0,44	13 41,5
3,0	13 11,6	0,17	81 57,5	0,33	16 47,9
2,63	16 37,5	0,08	119 15,8	0,27	20 24,0
2,22	19 54,6	$V = -1630 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$		0,2	29 59,2
1,98	23 33,5			0,17	36 21,2
1,74	27 23,9	3,0	0 ^m 30,0 ^s	0,09	44 55,8
1,48	30 53,4	2,96	1 0	0,03	58 39,2
1,27	34 44,7	2,72	2 15,6	$V = -1630 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$	
1,05	39 57,3	2,38	3 46,7	1,02	0 ^m 30,0 ^s
0,84	45 55,5	2,32	4 45,6	0,96	1 0
0,52	56 22,5	2,16	5 33,6	0,76	2 9,6
0,38	66 30,5	1,99	6 54,1	0,61	3 14,9
0,28	78 9,6	1,88	7 57,6	0,45	4 16,8
0,18	97 27,0	1,75	8 48,0	0,4	5 28,8
0,14	129 1,8	1,67	9 40,8	0,39	6 16,2
0,07	161 26,6	1,59	10 37,3	0,3	7 48,0
$V = -1630 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$		1,19	14 4,8	0,28	8 43,2
5,37	0 ^m 30,0 ^s	0,91	18 4,8	0,26	9 34,2
5,09	1 0	0,68	21 52,7	0,21	10 57,6
4,66	2 3,6	0,48	25 28,7	0,16	13 6,8
4,2	3 33,3	0,36	29 19,4	0,13	22 54,6
3,97	4 28,8	0,29	32 49,6	0,11	28 5,8
3,81	5 31,2	0,14	44 59,9		
3,44	6 41,0	0,07	55 17,9		

Ein dem Paraffin ganz analoges Verhalten zeigt Schwefel.

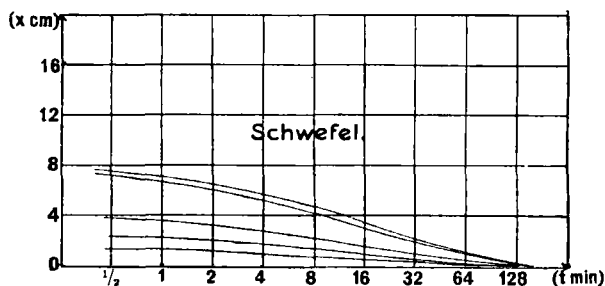


Fig. 10.

Schwefel.

x	t	x	t	x	t
$V = -1630 \text{ V. } T = 3 \text{ Min.}$		0,13	125 ^m 26,4 ^s	0,64	85 ^m 7,2 ^s
		0,04	139 31,2	0,3	99 12,0
				0,09	126 43,2
7,56	0 ^m 30,0 ^s	$V = -1630 \text{ V. } T = 2 \text{ Min.}$		$V = -1630 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$	
7,08	1 0	7,2	0 ^m 30 ^s ,0		
6,43	2 6,0	6,68	1 0	3,86	0 ^m 30,0 ^s
5,75	3 51,1	5,93	2 4,8	3,66	1 0
5,55	4 21,6	5,22	3 42,3	3,32	2 10,8
5,32	5 33,6	5,04	4 26,4	3,08	3 13,2
5,05	6 38,4	4,71	5 31,2	2,86	4 0,5
4,86	7 7,9	4,5	6 36,0	2,65	5 16,8
4,59	8 28,8	4,31	7 6,7	2,52	6 21,6
4,39	9 36,0	4,0	8 43,2	2,35	7 17,5
4,25	10 17,6	3,87	9 45,6	2,16	8 58,4
3,74	13 58,9	3,8	10 20,3	2,04	9 40,8
3,28	17 11,1	3,29	13 30,1	1,95	10 57,6
2,96	20 43,9	2,85	17 39,1	1,85	13 17,6
2,78	23 54,1	2,51	21 10,3	1,57	17 13,0
2,34	27 16,2	2,38	24 42,8	1,34	20 32,4
2,17	30 25,4	2,18	27 57,2	1,18	23 43,6
2,05	33 42,9	1,98	31 47,1	1,06	27 54,3
1,68	41 25,0	1,78	35 35,9	0,86	31 58,1
1,31	53 5,6	1,61	41 23,8	0,76	35 13,5
1,05	65 50,2	1,5	47 22,6	0,7	39 15,6
0,81	76 48,0	1,31	52 54,8	0,66	43 5,0
0,66	83 23,6	1,15	60 57,0	0,57	48 48,2
0,34	98 45,3	0,8	70 24,0	0,49	54 44,0
0,24	115 45,3				

Schwefel.

x	t	x	t	x	t
$V = -1630 \text{ V. } T = 1 \text{ Min.}$		1,13	10 ^m 38,4 ^s	0,95	3 ^m 41,3 ^s
0,29	65 ^m 40,1 ^s	0,95	14 12,5	0,81	4 58,5
0,13	86 10,8	0,81	17 39,1	0,77	5 52,8
0,07	103 12,4	0,7	20 51,7	0,72	6 43,2
		0,52	24 28,6	0,69	7 45,6
		0,41	27 33,8	0,66	8 57,6
$V = -1630 \text{ V. } T = \frac{1}{2} \text{ Min.}$		0,38	30 44,3	0,64	9 55,2
2,37	0 ^m 30,0 ^s	0,23	41 17,7	0,62	10 11,6
2,2	1 0	0,18	52 0,9	0,6	13 51,8
2,01	2 13,2	0,07	62 3,7	0,58	15 14,9
1,79	3 36,9			0,46	18 30,9
1,69	4 21,6	$V = -1630 \text{ V. } T = \frac{1}{4} \text{ Min.}$		0,35	21 53,5
1,55	5 33,6			0,3	25 26,2
1,42	6 38,4	1,4	0 ^m 30,0 ^s	0,29	28 57,1
1,32	7 43,2	1,32	1 0	0,16	35 14,2
1,26	8 48,0	1,18	2 22,8	0,06	48 38,4
1,19	9 45,6				

Auch Hasenöhl fand bei Schwefel eine deutliche Nachwirkung. Höchst auffällig ist es, daß Paraffin sowohl wie Schwefel einen durchaus ähnlichen, ja fast gleichen Verlauf der Nachwirkung besitzen, der von dem der anderen Isolatoren vollkommen abweicht. Während die letzteren innerhalb des Beobachtungsgebietes nur einen Wendepunkt besitzen, treten bei den ersteren zwei Wendepunkte auf. Auch die Stärke der dielektrischen Erregung ist bei ihnen weit kleiner und erreicht für Paraffin $x = 6,47 \text{ cm}$, für Schwefel einen größeren Betrag, $x = 7,56 \text{ cm}$. Im Vergleich zu der schwachen Erregung dauert die Nachwirkung sehr lange, bei Paraffin für $T = 3 \text{ Min.}$ und $V = -1630 \text{ Volt}$ fast 3 und bei Schwefel für $T = 3 \text{ Min.}$ und $V = -1630 \text{ Volt}$ fast 2 Stunden. Kleine Expositionszeiten und geringe Spannungen lösen auch hier wie bei den anderen benutzten Materialien Nachwirkungen von sehr kurzer Dauer aus.

c) Abhängigkeit der Nachwirkungen von T und V .

Um die Größe der Nachwirkung für verschiedene T bei konstantem V zu veranschaulichen, greifen wir aus der Reihe von t und x ein bestimmt gewähltes t und x heraus. Wir nehmen den Wert $t=1$ und bezeichnen nach Kohlrausch x_1 für $t=1$ als die Größe der Nachwirkung. In nachstehenden Figuren bezeichnen die mit I, II, III, IV, V und VI versehenen Kurven die für ein bestimmtes Potential (I = - 3210, II = - 2620, III = - 2120, IV = - 1630, V = - 980 und VI = - 490 Volt) gefundene Abhängigkeit der Größe der Nachwirkung von verschiedenem T . Bis zu $T = \frac{1}{4}$ Min. wachsen die Nachwirkungskurven mit einem Wendepunkt an und steigen dann weiterhin mit zwei oder mehreren Wendepunkten für kleinere V langsamer und für größere V schneller als die Größe T an, um mit wachsendem T sich langsam scheinbar einem Maximum zu nähern. Die verschiedenen Materialien zeigen einen vollkommen verschiedenen Verlauf.

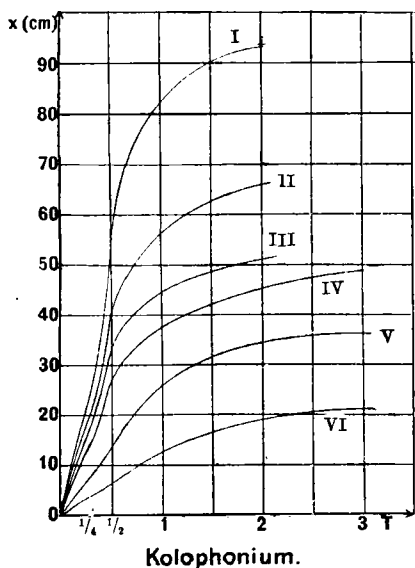


Fig. 11.

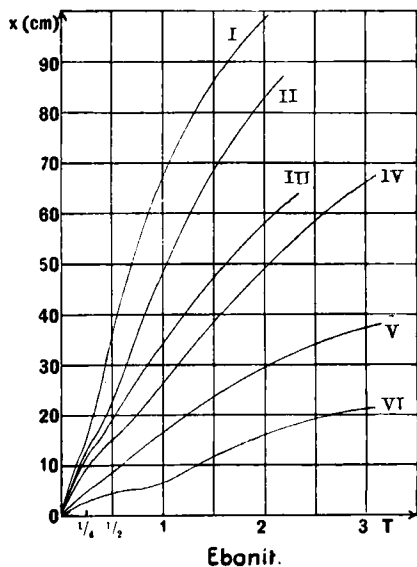


Fig. 12.

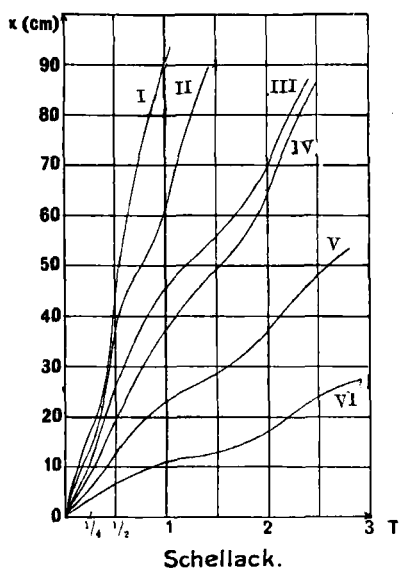


Fig. 13.

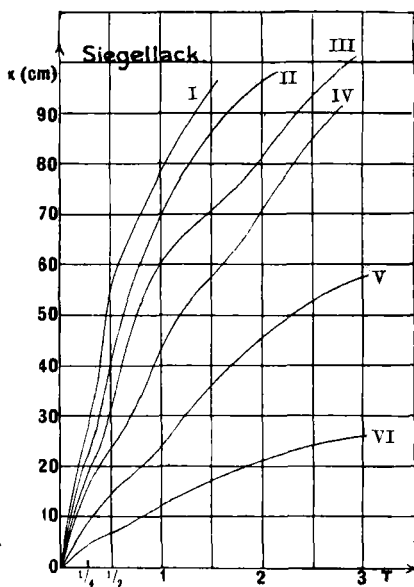


Fig. 14.

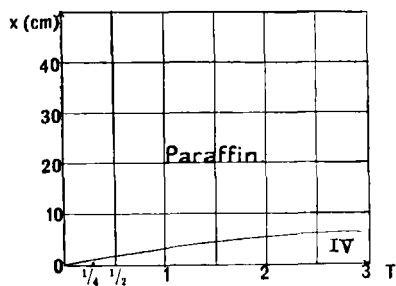


Fig. 15.

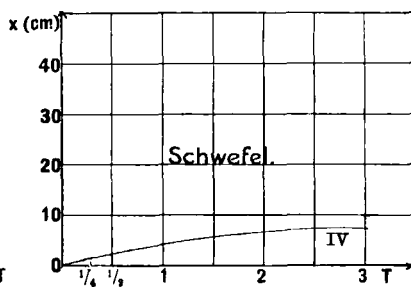


Fig. 16.

Über die Größe der Nachwirkung für verschiedene Spannungen geben nachstehende Kurven Aufschluß.

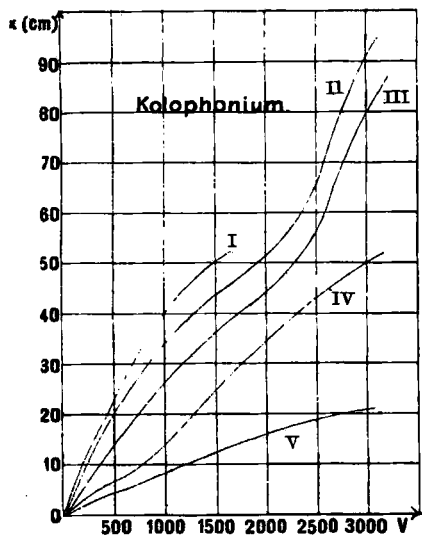


Fig. 17.

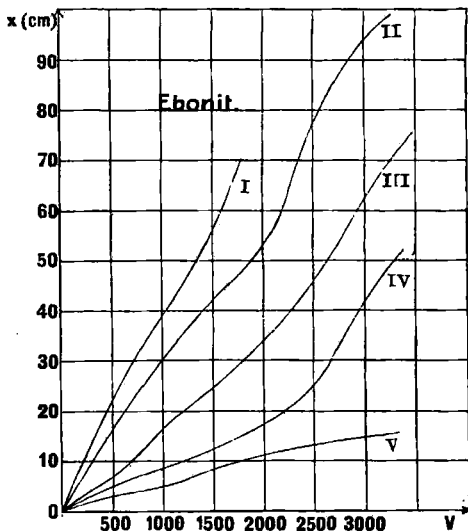


Fig. 18.

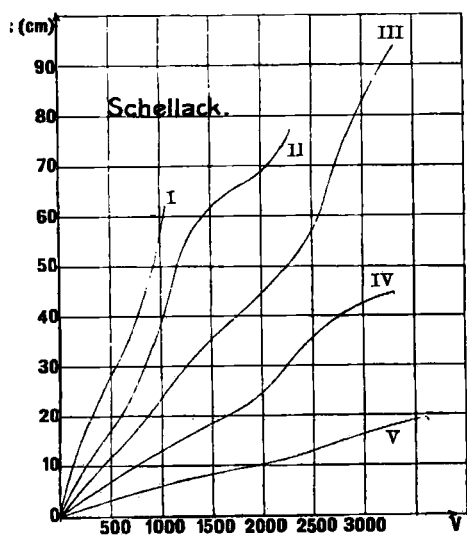


Fig. 19.

Annalen der Physik, IV. Folge. 41.

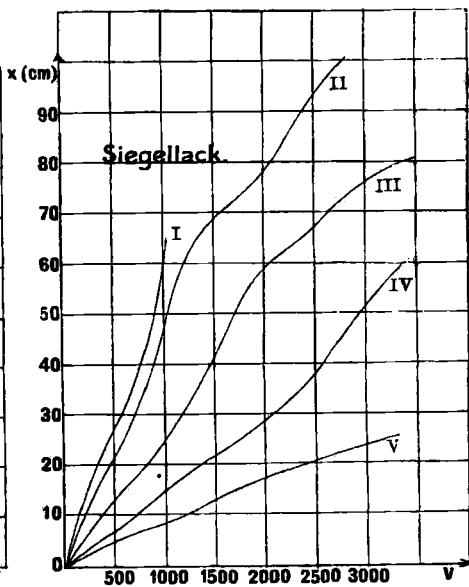


Fig. 20.

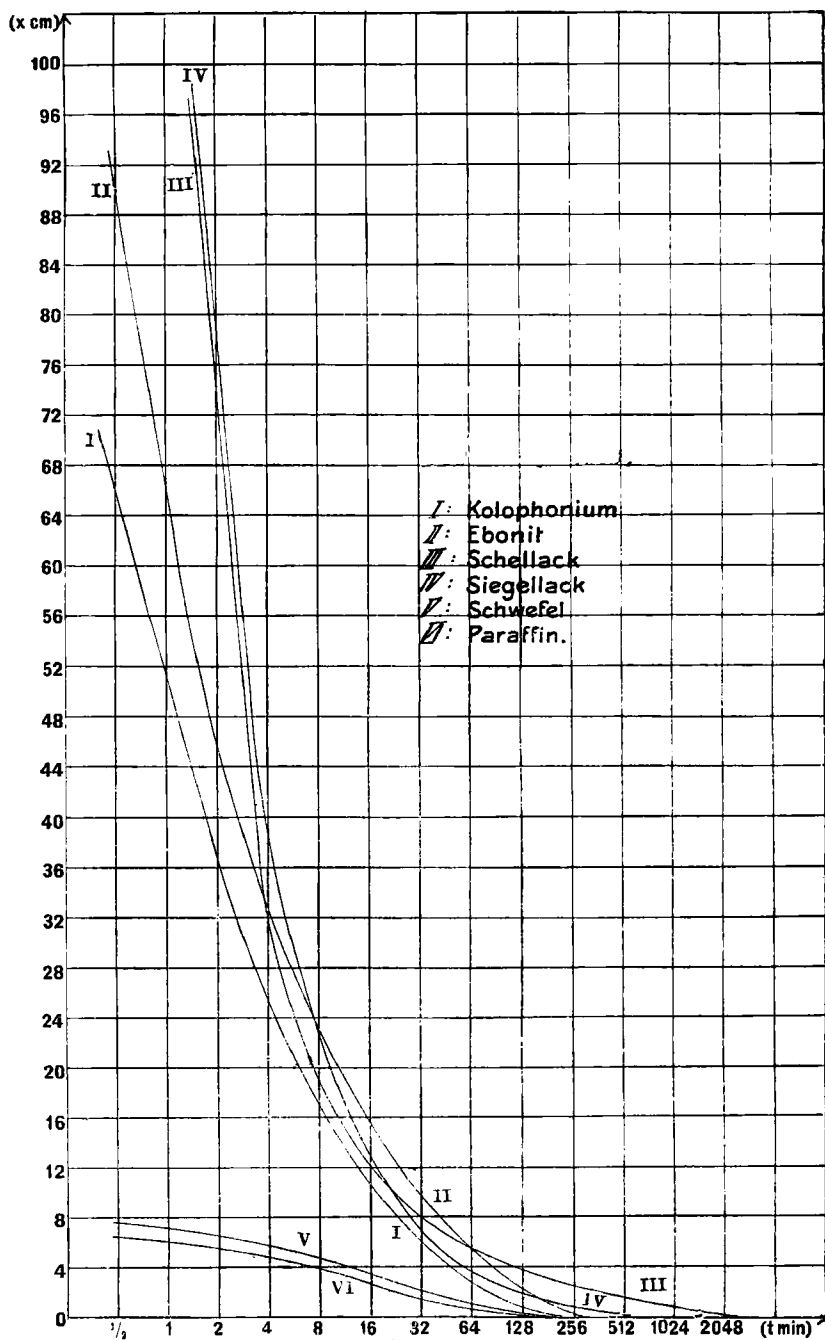


Fig. 21.

Die Bezeichnungen I, II, III, IV und V sind eingeführt für $T = 3$ Min. (I), $T = 2$ Min. (II), $T = 1$ Min. (III), $T = \frac{1}{2}$ Min. (IV) und $T = \frac{1}{4}$ Min. (V). Bei kleinem T wächst die Größe der Nachwirkung mit einem Wendepunkt bei V ca. 0—500 Volt langsam an, bei größerem T steigt sie schneller an als die Größe der Spannung. In den Kurven für größere T ist für $V = 0$ —500 Volt der regelmäßige Wendepunkt deutlich ausgeprägt, bei wachsendem V finden wir oft zwei und mehrere Wendepunkte. Auch hier geben die verschiedenen Materialien ein vollkommen verschiedenes Bild der Größe der Nachwirkung.

Zum Schlusse folgt eine übersichtliche Darstellung der Nachwirkungskurven der untersuchten Dielektrika. Wir beschränken uns nur auf die Kurven, die sich für $T = 3$ Min. und $V = -1630$ Volt ergeben.

§ 6. Einfluß der Luftionen.

Der Einfluß, den die γ -Strahlen in der Luft auf das Abklingen der Nachwirkung ausüben, ist im Original berechnet. Um ihn zu ermitteln, wird die Entladungskurve eines isoliert aufgehängten, geladenen Messingzylinders von denselben Dimensionen wie die Isolatoren beobachtet. Das Resultat zeigt, daß die Luftionen die Nachwirkungen nur äußerst schwach beeinflussen. Es müssen daher Kräfte wesentlich anderer Natur die Hauptrolle spielen. Wie diese beschaffen sein können, darüber wollen wir im folgenden Abschnitt sprechen.

§ 7. Versuch einer Erklärung der verschiedenartigen Nachwirkungen der Dielektrika und Schluß.

Die älteren Theorien über dielektrische Erregung, die sich eng an die Poissonsche Anschauung über das Wesen des induzierten Magnetismus anlehnen, sind von Faraday, Mosotti und Clausius ausgebaut und basieren auf der Annahme körperlicher leitender Moleküle, die im isolierenden Medium eingebettet und als Träger der dielektrischen Wirkungen anzusprechen sind. Dieser Hypothese ist die moderne Auffassung der dielektrischen Erscheinungen nahe verwandt. Sie ist niedergelegt in der Elektronentheorie, die die Existenz elektrischer Atome (Elektronen) an die Spitze stellt.

Im Nichtleiter sind diese Elektronen innerhalb der Wirkungssphäre der einzelnen ponderabelen, positiv geladenen Moleküle beweglich und durch eine Art elastische Kräfte, „quasielastische Kräfte“ genannt, die der elektrischen Feldstärke proportional sind, an eine bestimmte Gleichgewichtslage gebunden. Mit dieser Annahme müssen wir nach den Gesetzen der Elektronentheorie die Vorstellung verknüpfen, daß die negativ geladenen Elektronen innerhalb der räumlich verteilten positiven Ladungen in sehr kleinen Elongationen Schwingungen von bestimmter Dauer und bestimmtem Dämpfungsverhältnis ausführen. Diese Größen bedingen die Zeit, die nötig ist, bis das erregte Elektron seinen stabilen Gleichgewichtszustand wieder erreicht.

Wenden wir unsere Betrachtungen auf die dielektrischen Nachwirkungserscheinungen an, so gestatten diese Annahmen eine Erklärung unserer Beobachtungen. Wirkt auf ein Dielektrikum ein elektrisches Feld ein, so werden die Elektronen „Polarisationselektronen“ im obigen Sinne aus ihrer Ruhelage verschoben und bedingen die dielektrische Polarisation des Körpers. Daneben tritt aber in jedem Isolator eine mehr oder weniger stark ausgebildete zweite Ionengattung auf. Bereits Maxwell schreibt jedem Dielektrikum eine gewisse Leitfähigkeit zu. Es sind daher neben Polarisationselektronen auch frei bewegliche Leitungselektronen vorhanden, so daß sich die Dichte der elektrischen Ladung auf der Oberfläche eines Dielektrikums aus der der Polarisationselektronen und der der Leitungselektronen zusammensetzt. In jedem polarisierten Dielektrikum wird nach Aufhebung des elektrischen Feldes die durch die Leitungselektronen bewirkte Ladung dem Ohmschen Gesetze gemäß allmählich abklingen; die Polarisationselektronen werden infolge der durch die schwingende Bewegung ihnen innewohnenden lebendigen Kraft, dem Gesetze der Trägheit folgend, nicht sofort ihre stabile Ruhelage einnehmen, sondern je nach der Größe der Dauer ihrer Schwingungen und ihres Dämpfungsverhältnisses erst nach geraumer Zeit dahin zurückkehren.

Unsere Nachwirkungskurven superponieren sich daher aus zwei verschiedenen Elementen. Je nachdem das eine oder das andere überwiegt, ist der Verlauf der Nachwirkung ein anderer.

Von diesem Gesichtspunkte ausgehend, wäre das starke Anwachsen der dielektrischen Erregung bei Ebonit, Schellack und Siegellack neben der Erregung durch Polarisation einem bedeutenden Einfluß der Leitfähigkeit zuzuschreiben, während Paraffin und Schwefel mehr den Einfluß der Polarisation hervortreten lassen, und bei diesen die Leitfähigkeit stark in den Hintergrund gedrängt erscheint. Dies erklären auch die für die Leitfähigkeit ermittelten Werte. Nach der Tabelle in Landolt und Börnstein¹⁾ ist nach Curie die Leitfähigkeit für Ebonit bei der Temperatur $t = 20^{\circ}$ $\lambda = 0,486 \cdot 10^{-15}$. W. Dietrich²⁾ gibt für Schellack bei $t = 22^{\circ}$ $\lambda = 0,581 \cdot 10^{-15}$, für Siegellack bei $t = 18^{\circ}$ $\lambda = 1,37 \cdot 10^{-15}$ (?) an. λ für Kollophonium wurde in der Literatur nicht gefunden. Nach Hasenöhr³⁾ finden wir für Paraffin $\lambda = 2 \cdot 10^{-21}$ und Schwefel $\lambda = 8 \cdot 10^{-21}$ bei Zimmertemperatur. Diese Werte lassen ganz bedeutende Unterschiede in der Leitfähigkeit der verschiedenen Isolatoren erkennen und entscheiden in unserem Sinne. Das starke Anwachsen der dielektrischen Erregung bei Ebonit, Schellack und Siegellack entspricht dem relativ großen Leitvermögen beider Substanzen, während die im Vergleich zu ihnen geringe Leitfähigkeit des Paraffins und Schwefels den großen Unterschied im Verlauf ihrer Nachwirkungskurven erklärt. Die Gesetzmäßigkeit, daß mit erhöhtem λ auch die Erregung anwächst, zeigt sich so recht deutlich neben Ebonit, Schellack und Siegellack auch bei Schwefel und Paraffin. Das größere Leitvermögen des Schwefels bedingt eine stärkere dielektrische Erregung, wie unsere Messungen ergeben haben.

Diese Betrachtungen gestatten, für die Praxis wichtige Schlüsse zu ziehen. Die geringe Leitfähigkeit gut gereinigten Paraffins, seine geringe Nachwirkung zeichnet es vor allen untersuchten Materialien als besten Isolator aus. Fast gleichwertig mit ihm ist Schwefel, während die anderen Substanzen infolge ihrer starken Nachwirkung und größeren Leitungsfähigkeit gegen diese zurücktreten müssen.

1) H. Landolt u. R. Börnstein, 3. Aufl. p. 724.

2) W. Dietrich, Gött. Inaug.-Diss. 1909.

3) F. Hasenöhr, l. c.

C. Anhang.

Anwendung der Wiechertschen Theorie über elastische Nachwirkungen.

Der durchaus ähnliche Verlauf der Nachwirkungskurven bei dielektrischer Erregung mit denen bei elastischer Nachwirkung legt uns die Frage nahe, ob sich nicht unsere Erscheinungen mit der Theorie über elastische Nachwirkung in Einklang bringen lassen. Schon Kohlrausch¹⁾ zieht Vergleiche zwischen der Ähnlichkeit des Verlaufes des Rückstandes in Leidener Flaschen und der elastischen Nachwirkung. Später hat Hopkinson²⁾ die Rückstandsbildung durch Boltzmanns³⁾ Theorie über elastische Nachwirkung darzustellen versucht. In neuerer Zeit hat E. Wiechert⁴⁾ eine allgemeine Nachwirkungstheorie entwickelt, die die Ansätze der Theorien von F. Kohlrausch⁵⁾ und Boltzmann über elastische Nachwirkungen in sich aufnimmt. Durch eine Reihe eigener und früherer Beobachtungen fand Wiechert seine Theorie bestätigt. In letzter Zeit erwies sie sich durch die Untersuchungen von H. Tobusch⁶⁾ sowohl für die Erklärung der elastischen als auch magnetischen Nachwirkungen als brauchbar.

Wir wollen untersuchen, ob sich unsere Nachwirkungskurven über dielektrische Erregung dieser Theorie fügen. Es erübrigt, auf ihre Entwicklung näher einzugehen, da sie in den zitierten Arbeiten ausführlich dargestellt ist. Wir begnügen uns mit der Angabe der Hauptsätze, nach denen unsere Berechnung ausgeführt ist. Aus der Theorie ergibt sich die Gleichung für die Nachwirkung zu einer beliebigen Zeit t :

$$x_t = \vartheta \{ \bar{\psi}(t) - \bar{\psi}(t + T) \} + S_1 + S_2,$$

1) R. Kohlrausch, (Pogg. Ann. 91. p. 56, 179. 1854.

2) B. Hopkinson, Phil. Trans. 167. p. 599. 1877.

3) L. Boltzmann, Wien. Ber. 270. p. 275. 1874; Pogg. Ann. Erg. Bd. 7. p. 624. 1876).

4) E. Wiechert, Königsb. Inaug.-Diss. 1889; Wied. Ann. 50. p. 335, 546. 1893.

5) F. Kohlrausch, Pogg. Ann. 128. p. 1. 1866.

6) H. Tobusch, Gött. Inaug.-Diss. 1908; Ann. d. Phys. 26. p. 439. 1908.

worin

$$S_1 = x_i \{ \bar{\psi}(t) - \bar{\psi}(T) \} \quad \text{und} \quad S_2 = - \int_0^T \{ \bar{\psi}(T-t) - \bar{\psi}(T) \} dx_i$$

bedeuten. Die Glieder S_1 und S_2 können als sehr kleine Korrektionsgrößen gewöhnlich außer acht gelassen werden. Wir erhalten daher die Gleichung:

$$x_i = \mathcal{D} \{ \bar{\psi}(t) - \bar{\psi}(t+T) \}.$$

$\bar{\psi}$ berechnet sich aus:

$$\bar{\psi}(t) = \frac{\psi(t)}{c + \psi(\bar{t})},$$

wobei \bar{t} ein passend gewähltes Zeitintervall meistens 1 und c eine Konstante ist. Wir können daher setzen: $\bar{\psi}(t) = C \psi(t)$; die Funktion $\psi(t)$ wird aus einer Summe von Gliedern gebildet, die sich darstellt $\sum \epsilon e^{-t/\epsilon}$. Aus theoretischen Überlegungen folgt, daß \sum in \int übergeführt werden kann. Wir erhalten einen Ausdruck von der Form:

$$\psi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi e^{-\frac{t}{\epsilon}} d \ln \frac{\epsilon}{r}.$$

Unter Berücksichtigung ähnlicher Beziehungen in der Lehre der Wahrscheinlichkeitsrechnung und einiger Umformungen erhalten wir eine Gleichung:

$$\psi(t) - \psi(\eta) = g(\eta^\gamma - t^\gamma); \quad \psi(t) = \text{konst.} - g t^\gamma.$$

Setzen wir diese Werte in unsere Ausgangsgleichung, so erhalten wir:

$$x_i = \mathcal{D} \{ C(\text{konst.} - g t^\gamma) - C(\text{konst.} - g(T+t)^\gamma) \},$$

$$x_i = G \{ (T+t)^\gamma - t^\gamma \}$$

unter Vernachlässigung der Korrektionsglieder S_1 und S_2 . In der Konstanten G steckt die Größe des elektrischen Feldes. G und γ sind zwei universelle Konstanten, die für ein bestimmtes Feld und für verschiedene Expositionszeiten T denselben Wert behalten müssen. Hierin bestehen die großen Vorzüge der Wiechertschen Theorie über die allgemeine Nachwirkung gegenüber allen übrigen Ansätzen. Aus passend gewählten G und γ läßt sich eine große Reihe von Nachwirkungskurven für mannigfache T im voraus berechnen. Ändern

wir G in geeigneter Weise, dann können wir eine zweite Gruppe von Nachwirkungen darstellen.

Aus dem reichhaltigen Material sind unserer Berechnung nur die Beobachtungen von Siegellack für $V = -490$ Volt und $T = 3, 2, 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ Min. zugrunde gelegt, weil diese Messungen eine gute Übereinstimmung mit den Kontrollmessungen zeigen, und wir beabsichtigen, die Theorie an einem Versuche zu prüfen, bei dem ein schwaches Feld angelegt ist. Die folgende Tabelle enthält die beobachteten Werte x und die berechneten x_t . Δ bezeichnet die Differenz zwischen x und x_t .

$$G = 1736,41. \quad \gamma = 0,09538.$$

t	x (mm)	x_t (mm)	Δ	t	x (mm)	x_t (mm)	Δ
$V = -490$ V. $T = 3$ Min.				$V = -490$ V. $T = 2$ Min.			
0 ^m 30,0 ^s	371,8	331,43	+40,37	0 ^m 30,0 ^s	310,3	269,79	+40,51
1 0	261,7	245,34	+16,36	1 0	210,0	191,87	+18,13
2 3,6	179,2	166,35	+12,85	2 1,2	134,8	125,89	+8,91
3 12,0	142,8	126,41	+16,39	3 44,9	90,5	81,96	+8,54
4 2,4	118,4	108,01	+10,39	4 0,7	85,5	78,14	+7,36
5 14,4	102,4	89,77	+12,63	5 16,8	71,2	63,2	+8,0
6 4,8	91,6	80,4	+11,2	6 40,8	58,1	52,61	+5,49
7 33,5	73,4	67,89	+5,51	7 19,5	52,4	48,97	+3,43
8 33,6	66,6	61,99	+4,61	8 38,4	44,8	42,89	+1,91
9 21,6	62,7	57,65	+5,05	9 31,2	41,2	38,9	+2,3
10 57,3	55,2	51,05	+4,15	10 43,2	38,7	35,77	+2,93
14 19,2	41,7	40,98	+0,72	11 1,5	36,8	34,9	+1,9
17 57,1	34,0	33,86	+0,14	14 19,5	28,4	27,96	+0,44
21 51,0	28,7	28,83	-0,13	17 48,0	22,9	23,44	+0,54
25 2,0	24,8	25,7	-0,9	21 18,5	20,1	19,97	+0,13
28 6,6	22,2	23,27	-1,07	24 43,4	16,2	17,54	-1,34
31 34,9	19,3	20,84	-1,54	28 25,2	14,3	15,45	-1,15
35 8,5	17,2	19,1	-1,9	31 52,2	12,5	14,07	-1,57
45 29,6	13,6	15,11	-1,51	35 32,7	10,1	12,85	-2,75
55 36,9	10,6	12,85	-2,25	40 48,8	9,0	11,29	-2,29
70 57,7	7,6	10,42	-2,82	49 5,0	7,4	9,55	-2,15
86 0,6	5,7	8,68	-2,98	62 24,0	4,7	7,81	-3,11
95 11,9	4,9	7,12	-2,22	70 34,1	3,2	6,95	-3,75
116 11,8	3,3	6,77	-3,47	86 21,5	2,5	5,73	-3,23
158 21,6	1,3	5,04	-3,74	100 17,1	1,1	5,04	-3,94
178 17,6	0,9	4,52	-3,62	118 20,9	0,7	4,34	-3,64
224 18,1	0,2	3,82	-3,62	148 37,7	0,1	3,65	-3,55

$$G = 1736,41. \quad \gamma = 0,09538.$$

t	$x(\text{mm})$	$x_t(\text{mm})$	Δ	t	$x(\text{mm})$	$x_t(\text{mm})$	Δ
$V = -490 \text{ V.} \quad T = 1 \text{ Min.}$				8 ^m 38,4 ^s	11,2	11,63	- 0,43
0 ^m 30,0 ^s	192,9	179,49	+ 13,41	9 40,8	10,0	10,42	- 0,42
1 0	124,8	119,12	+ 5,68	10 53,3	9,5	9,2	+ 0,3
2 0	75,1	73,28	+ 1,82	13 59,9	6,5	7,47	- 0,97
3 35,5	47,5	46,53	+ 0,97	19 2,4	5,4	5,73	- 0,33
4 22,2	39,6	39,76	- 0,16	22 4,6	4,6	5,04	- 0,44
5 16,8	33,6	33,86	- 0,26	25 29,2	3,3	4,34	- 1,04
6 43,0	27,6	27,61	- 0,01	27 58,7	3,1	4,17	- 1,07
7 38,4	22,8	24,83	- 2,03	31 34,3	2,3	3,47	- 1,17
8 33,8	21,0	22,57	- 1,57	35 23,2	2,0	3,3	- 1,3
9 53,6	19,4	19,97	- 0,57	41 15,6	0,9	2,77	- 1,87
10 57,6	17,9	18,23	- 0,33	46 44,2	0,5	2,61	- 2,11
12 12,2	14,4	16,5	- 2,1	52 8,0	0,3	2,26	- 1,96
15 27,0	11,8	13,54	- 1,74	61 29,8	0,1	2,08	- 1,93
18 54,5	9,7	11,98	- 2,28	$V = -490 \text{ V.} \quad T = 1/4 \text{ Min.}$			
23 13,0	7,7	9,55	- 1,85	0 ^m 30,0 ^s	77,3	64,02	+ 13,28
26 51,4	5,8	8,34	- 2,54	1 0	43,8	37,33	+ 6,47
30 25,5	5,0	7,47	- 2,47	2 6,0	25,2	20,14	+ 5,06
33 47,2	4,2	6,77	- 2,57	3 55,0	14,3	11,63	+ 2,67
36 49,5	3,4	6,25	- 2,85	4 28,8	12,8	10,42	+ 2,38
42 34,1	3,1	5,56	- 2,46	5 38,4	10,8	8,51	+ 2,31
53 2,8	1,5	4,52	- 3,02	6 40,8	9,3	7,29	+ 2,01
63 50,4	1,1	3,82	- 2,72	7 10,4	8,5	6,95	+ 1,55
85 9,9	0,8	2,78	- 1,98	8 38,4	7,2	5,9	+ 1,3
92 4,3	0,2	2,61	- 2,41	9 26,4	6,9	5,38	+ 1,52
$V = -490 \text{ V.} \quad T = 1/2 \text{ Min.}$				10 14,6	5,3	5,04	+ 0,26
0 ^m 30,0 ^s	120,5	111,08	+ 9,42	13 34,2	4,0	3,82	+ 0,18
1 0	63,6	68,42	- 4,82	16 47,8	3,8	3,13	+ 0,67
2 10,8	36,8	37,16	- 0,36	19 57,3	3,5	2,78	+ 0,72
3 46,2	23,8	23,62	+ 0,18	23 47,4	2,8	2,43	+ 0,37
4 33,6	20,5	19,97	+ 0,53	28 50,1	2,0	2,08	- 0,08
5 14,4	18,8	17,89	+ 0,91	34 6,3	1,2	1,56	- 0,36
6 50,5	13,7	14,07	- 0,37	39 2,8	0,7	1,56	- 0,86
7 19,2	13,2	13,2	$\pm 0,00$	48 9,7	0,4	1,22	- 0,82

Bei großem Ausschlage x finden wir zwischen beobachteten und berechneten Werten sehr große Unterschiede. Hat die Nachwirkung den Betrag $x = \text{ca. } 4 \text{ cm}$ erreicht, so zeigt

der berechnete Wert x_t mit dem beobachteten x befriedigende Übereinstimmung. Wir können daher die Vermutung aussprechen, daß bei kleinen dielektrischen Erregungen die allgemeine Wiechertsche Nachwirkungstheorie auch die dielektrische Nachwirkung darzustellen gestattet, eine Annahme, die sich mit der Ansicht Wiecherts deckt. Denn er folgert aus den Berechnungen von Kohlrauschs Beobachtungen über die Torsionsnachwirkung an einem Silberdraht, daß seine Theorie nur für kleine Deformationen gültig ist.

Eine zuletzt beobachtete Erscheinung an Ebonit läßt schließen, daß sich auch die bei stärkerem elektrischen Felde beobachtete dielektrische Erregung vielleicht von Anfang an der Wiechertschen Theorie fügt. Es war beabsichtigt, mit Ebonit eine Kontrollmessung auszuführen. Der Körper war $\frac{3}{4}$ Jahre vorher untersucht und bis dahin unter Lichtabschluß im Exsikkator aufbewahrt. Unter der größten Vorsicht wird er zur zweiten Untersuchung in den Versuchsapparat gebracht und nach einigen Tagen, als alle Oberflächenladung verschwunden ist, einem Potential $V = -1630$ Volt bei einer Expositionszeit $T = 3$ Min. ausgesetzt. Nach $t = 30$ Sek. erhalten wir einen Ausschlag $x = 19,27$ Skt. Eine zweite Kontrollmessung ergibt nach $t = 30$ Sek. $x = 18,82$ Skt., während wir $\frac{3}{4}$ Jahre vorher für $x = 88,91$ Skt. fanden. Infolge der Kürze der Zeit konnten ausführlichere Untersuchungen nicht vorgenommen werden. Ob chemische Einflüsse, ausgelöst durch Einwirkung trockener Luft auf Ebonit, eine wesentliche Rolle spielen, oder jedes Dielektrikum einige Zeit braucht, bis es nach mechanischer Bearbeitung einen Normalzustand erreicht, darüber zu entscheiden, bedarf es weiterer Versuche.

D. Zusammenfassung.

Unsere Untersuchungen sind in zwei getrennten Zylinderkondensatoren ausgeführt. Im ersten wird das elektrische Feld erzeugt und das zu untersuchende Dielektrikum dielektrisch erregt, während im zweiten die dielektrische Erregung durch Influenzierung der inneren Elektrode mittels eines Quadrantenelktrometers gemessen wird. Untersucht werden: Kolophonium, Ebonit, Schellack, Siegelack, Schwefel und Paraffin. Beide

letzten werden nur darauf geprüft, ob sie eine Nachwirkung zeigen.

Frisch hergestellte Dielektrika zeigen statische Ladungen, die weder durch die Flamme, noch durch Röntgenstrahlen oder Einwirkung eines radioaktiven Präparates beseitigt werden können. Erst nach $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Jahren vollkommener Ruhe bewirkt der Einfluß des Präparates ein vollständiges Verschwinden der Oberflächenladung.

Die Beobachtungen sind in Kurven und Tabellen niedergelegt. Die Nachwirkung wächst mit der Stärke und Dauer des einwirkenden Feldes. Die Geschwindigkeit, mit der die dielektrische Erregung abklingt, wird mit wachsender Größe und Dauer des elektrischen Feldes kleiner. Bei konstanter Spannung wächst die Größe der Nachwirkung für kleine V langsamer als die der Expositionszeit T . Für größere V steigt die Nachwirkung schnell an, um dann mit wachsendem T sich scheinbar langsam einem Maximum zu nähern. Bei konstanter Expositionszeit T wächst die Nachwirkung bei kleinem T langsam an; größere T bewirken ein schnelleres Anwachsen der Nachwirkung als die Spannungszunahme beträgt.

Paraffin und Schwefel zeigen eine Nachwirkung.

Der Einfluß der Luftionen auf das schnelle Abklingen der Nachwirkungen ist sehr gering.

Es wird versucht, eine kurze Erklärung von den Nachwirkungserscheinungen bei dielektrischer Erregung zu geben und den Unterschied des Verlaufes der Nachwirkungskurven von Ebonit, Schellack, Siegellack, Paraffin und Schwefel auf die verschiedenartigen Leitfähigkeiten zurückzuführen.

Im Anhang folgt eine Anwendung der Theorie über elastische Nachwirkungen von E. Wiechert auf unsere Resultate, und ein Versuch, die Abweichungen unserer berechneten Werte von der Wiechertschen Theorie zu erklären.

Göttingen, Physik. Inst. d. Universität.

(Eingegangen 11. Mai 1913.)
