

Untersuchung über die Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante einiger Preßspan- und Pilit-Isolatoren.

Physik. Institut der Eidgen. Techn. Hochschule 1910—1912.

Von der

Eidgenössischen Technischen Hochschule
in Zürich

zur Erlangung der

Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften

genehmigte

Promotionsarbeit

vorgelegt von

Benvenuto Tedeschi, Dipl.-Maschineningenieur
aus Livorno.

Referent: Herr Prof. Dr. A. Schweitzer.

Korreferent: Herr Prof. Dr. P. Weiß.

Untersuchung über die Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante einiger Preßspan- und Pilit-Isolatoren.

Physik. Institut der Eidgen. Techn. Hochschule 1910—1912.

Von der

Eidgenössischen Technischen Hochschule
in Zürich

zur Erlangung der

Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften

genehmigte

Promotionsarbeit

vorgelegt von

Benvenuto Tedeschi, Dipl.-Maschineningenieur
aus Livorno.

Referent: Herr Prof. Dr. A. Schweitzer.

Korreferent: Herr Prof. Dr. P. Weiß.

ISBN 978-3-662-22866-1

ISBN 978-3-662-24800-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-24800-3

In dankbarer Ergebenheit
ist die vorliegende Arbeit
meinen lieben Eltern
gewidmet.

1. **Übersicht.** In vorliegender Arbeit werden die Resultate einer Reihe von Untersuchungen über die elektrischen Eigenschaften einiger Preßspan- und Pilitarten gegeben. Es wurden diese Materialien hauptsächlich auf Leitfähigkeit geprüft und auch einige Messungen zur Bestimmung ihrer Dielektrizitätskonstante durchgeführt.

Die Leitfähigkeits-Messungen verteilen sich auf die Bestimmung:

- a) der Leitfähigkeit als Funktion der Zeit,
- b) der Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur,
- c) der Leitfähigkeit als Funktion des Feuchtigkeitsgehaltes,
- d) der Leitfähigkeit als Funktion der Potentialdifferenz.

Die Messung der Dielektrizitätskonstante wurde in Funktion der Potentialdifferenz vorgenommen.

Die Materialien hatten die Form rechteckiger Platten. Auf beiden Seiten der Platten wurde die Oberfläche mit Wolfram-Pulver bestrichen, um einen besseren Kontakt mit den Kupfer-Elektroden herzustellen; ein Rand von ca. 12 mm wurde freigelassen. Die Platten wurden unter Zwischenschaltung von Staniolblättern zwischen zwei Elektroden aus elektrolytischem Kupfer von 13 mm Dicke gelegt, um eine gewisse Pressung der sich berührenden Oberflächen zu erhalten. Diese Pressung war pro cm^2 ca. 16 g.

Vier Säulen, die auf einem Holzbrettchen montiert waren, und deren obere Enden mit Hartgummi versehen waren, dienten zum Tragen der beiden Elektroden. Das Holzbrettchen wurde selbst auf eine dicke Paraffinplatte gelegt.

Folgende Isolationsmaterialien kamen zur Untersuchung:

1. Pilit Nr. 1, dunkelrot, glatte Oberfläche, 1,02 mm dick.
2. Pilit Nr. 2, mit Gold belegt, halbrauhe Oberfläche, rötlich, 0,757 mm dick.
3. Pilit Nr. 3, mit Gold belegt, halbrauhe Oberfläche, rötlich, 0,770 mm dick; gleiches Fabrikat wie Nr. 2.
4. Pilit Nr. 4, dunkelrot, raue Oberfläche, 0,760 mm dick.
5. Pilit Nr. 5, gleiches Fabrikat wie Nr. 4., 0,740 mm dick.
6. Pilit Nr. 6, dunkelrot, halbrauhe Oberfläche, 1,050 mm dick
7. Preßspan Nr. 1, hellfarbig, glatte Oberfläche, 0,933 mm dick.
8. Preßspan Nr. 2, hellfarbig, glatte Oberfläche, 0,975 mm dick.
9. Preßspan Nr. 3, gelbfarbig, glatte Oberfläche, 0,532 mm dick.
10. Preßspan Nr. 4, gleiches Fabrikat wie 9., 0,969 mm dick.
11. Preßspan Nr. 5, hellrötlich, glänzende Oberfläche, 0,493 mm dick.
12. Preßspan Nr. 6, gleiches Fabrikat wie 11., 0,504 mm dick.

Die Größe der Elektroden betrug faßt überall 264 cm^2 . Nur bei Nr. 2 und 3 war sie 188 cm^2 .

Die Dicken der Platten wurden erhalten als Mittelwert von je 20 Messungen, die mittels eines Mikrometers auf den Rändern der verschiedenen Platten in ungefähr gleichen Abständen gemacht wurden.

Die Methode der Messung der Leitfähigkeit besteht bekanntlich darin, daß das Isolationsmaterial dem Einfluß einer elektrischen Gleichspannung E ausgesetzt und der entstehende Strom gemessen wird.

Die Ströme wurden mit einem Drehspulen-Galvanometer System Desprez-d'Arsonval gemessen, dessen Empfindlichkeit von Tag zu Tag etwas variierte. Es wurde deshalb

diese Empfindlichkeit vor jeder Untersuchung genau bestimmt. Dazu dienen 1 Normal-Element von Clark, 1 Weston-Element von je 1 Megohm und 1 Kommutator. Dieser letztere diente zum Kommutieren der Stromrichtung. Ein dünner Nickelfaden wurde als Schmelzsicherung im Galvanometerkreis eingeschaltet, um das Galvanometer vor zu hohen Strömen zu schützen; weiter enthielt der Kreis einen Ausschalter, um das Galvanometer zur Ermittlung der Nullage stromlos machen zu können.

Folgendes Schema gibt ein Bild der bei der Eichung des Galvanometers verwendeten Schaltung (Fig. 1).

Ein dem Galvanometer parallel geschalteter Widerstandskasten w_1 gestattet, den Meßbereich des Galvanometers in weiten Grenzen zu vergrößern. Bei der Eichung wurde dieser Widerstand ausgeschaltet, es blieb im Stromkreis nur der Widerstand $2 \cdot 10^6$ Ohm. Zuerst wurde der Widerstand der Galvanometerspule ermittelt wie folgt:

Sei e die EMK, so wird:

$$e = i \cdot w + i_1 \cdot w_1$$

wobei w_1 = den bekannten parallel zum Galvanometer geschalteten Widerstand bedeutet. Ferner ist:

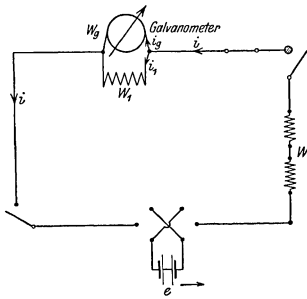


Fig. 1.

$$i_1 = i_g \cdot \frac{w_g}{w_1}$$

und

$$i = i_1 + i_g = i_g \left(\frac{w_1 + w_g}{w_1} \right),$$

woraus:

$$e = i_g \left(\frac{w_g + w_1}{w_1} \right) \cdot w + i_g \cdot w_g.$$

Durch das Galvanometer fließt also der Strom:

$$i_g = \frac{e \cdot w_1}{w(w_g + w_1) + w_g \cdot w_1}.$$

Schaltet man w_1 vom Galvanometer ab, so wird durch das Galvanometer der Strom i fließen, er berechnet sich aus:

$$i = \frac{e}{w + w_g}.$$

Durch Kombination dieser Gleichung mit der für i_g erhält man für den Galvanometerwiderstand:

$$w_g = \frac{i - i_g}{\frac{i_g}{w_1} + \frac{i_g}{w} - \frac{i}{w}}.$$

Es wurde nun w sehr groß ca. $2 \cdot 10^6$ Ohm gewählt; es ist mithin $\frac{i_g - i}{w}$ eine sehr kleine Größe, die vernachlässigt werden kann, wodurch sich die Gleichung für w_g vereinfacht zu:

$$w_g = \frac{i - i_g}{i_g} \cdot w_1.$$

Aus mehreren Messungen ergab sich

$$w_g = 10400 \Omega.$$

Zur vollständigen Isolierung wurde die größte Sorgfalt verwendet. Die Apparate wurden auf dicke Paraffinplatten gestellt, und die Leitungen hingen zwischen je 2 Klemmen frei in der Luft. Das Galvanometer stand auf Ambroinscheiben, die ihrerseits mittels dreier Porzellanstützen isoliert waren.

Die nötigen Spannungen lieferten kleine Akkumulatoren, deren je 50 auf einer Glasplatte hintereinander geschaltet und mit ihren kleinen Glasgefäßen in Paraffin eingelassen waren. Zu meiner Verfügung hatte ich 2500 solcher Blei-Akkumulatoren, die mir Spannungen bis ca. 5200 V liefern konnten. Die Hochspannungs-Akkumulatoren wurden regelmäßig alle 2 Tage geladen, manchmal auch öfters; bei richtiger Behandlung hielten sie ihre Spannung sehr lange konstant.

Es wurde die Spannung von jeder Reihe mittels eines Präzisions-Voltmeters von Siemens & Halske bis auf 0,1 Volt genau gemessen.

2. Leitfähigkeit als Funktion der Zeit. Für jede der zu untersuchenden Lamellen wurde in erster Linie der zeitliche Verlauf des Stromes und mithin die Leitfähigkeit in Funktion der Zeit gemessen.

Bei dieser Untersuchung wurde die folgende einfache Schaltung benutzt (Fig. 2):

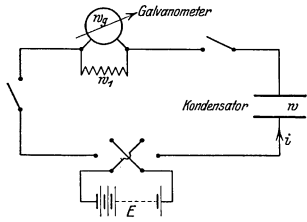


Fig. 2.

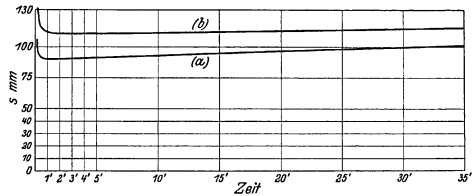


Fig. 3. Zeitlicher Verlauf des Stromes für Preßspan Nr. 1 bei der Spannung 100 V.

Die Batterie und der aus dem Untersuchungsmaterial gebildete Kondensator waren in Serie mit dem Galvanometer geschaltet; ein Kommutator gestattete, die Richtung des Stromes im Kreise zu ändern. Die Ablenkungen des Galvanometers wurden bis 0,1 mm genau mittels Skala und Fernrohr abgelesen.

Tabelle I.

Zeitlicher Verlauf des Stromes bei der Spannung 100 V für Preßspan Nr. 1.

a) Vor der Kommutierung		b) Nach der Kommutierung	
Zeit	s mm	Zeit	s mm
0	0,0	0	0,0
1'	89,9	1'	112,0
2'	89,75	2'	110,8
3'	90,0	3'	110,8
4'	90,5	4'	110,8
5'	91,0	5'	110,6
6'	91,3	6'	110,5
7'	91,7	7'	110,4
8'	92,2	8'	110,45
9'	92,5	9'	111,0
10'	92,8	10'	111,2
11'	93,5	11'	111,2
12'	93,8	12'	111,2
13'	94,1	13'	111,25
14'	94,3	14'	111,9
15'	94,7	15'	112,2
16'	95,2	16'	112,4
17'	95,5	17'	112,6
18'	95,9	18'	112,8
19'	96,2	19'	112,9
20'	96,7	20'	113,0
25'	97,9	25'	113,9
30'	99,4	30'	114,7
35'	101,0	35'	115,4

Für eine bestimmte Stromrichtung wurden die Ablesungen am Anfang alle Minuten vorgenommen, sodann alle 5 Minuten und nach längerer Zeit nach dem Einschalten alle 10 Minuten. Die Spannung der Batterie blieb während des Versuches, der höchstens eine Stunde dauerte, konstant.

Die Resultate für Preßspan Nr. 1 sind in Tabelle I zusammengestellt und in Fig. 3 graphisch dargestellt. Es bedeute in der Figur s den Ausschlag des Galvanometers, der der Leitfähigkeit proportional ist.

Aus der Kurve a) ist ersichtlich, daß die Leitfähigkeit am Anfang etwas fällt, dann aber nach 2 Minuten allmählich konstant zunimmt.

Wird nun der Strom bei der gleichen Spannung kommutiert (s. Fig. 1), so erhält man einen viel größeren Strom als vorher. Kurve b) gibt den Verlauf dieses Stromes nach der Kommutierung als Funktion der Zeit; man erhält eine der Kurve a) ähnliche, aber höher verlaufende Kurve. Die beiden Kurven nähern sich in ihrem weiteren Verlauf, um voraussichtlich, wenn man sie bei genau gleichen Verhältnissen genügend weit fortsetzen könnte, zusammenzufallen. Ähnliche Versuche wurden für die anderen Isoliermaterialien durchgeführt, die analoge Resultate ergaben.

Um den Einfluß der Feuchtigkeit des Dielektrikums wenigstens teilweise zu eliminieren, d. h. um die Lamellen bei ungefähr gleichen Verhältnissen untersuchen zu können, wurden

sie auf einer erwärmten Messingplatte bei einer Temperatur von etwa 60° während 10 bis 20 Minuten abgetrocknet.

Die oben erwähnten Versuche zeigten, daß der Strom bereits 2 Minuten nach dem Einschalten als nahezu konstant angesehen werden darf, da die Variationen nur sehr klein sind.

Der Stromverlauf in Funktion der Zeit wurde für Pilit Nr. 6 auch noch bei vier verschiedenen Spannungen aufgenommen, und zwar bei 200, 400, 600 und 800 Volt. Die Tabelle II und die Fig. 4 geben eine Zusammenstellung der bei diesen Versuchen gefundenen Resultate. Aus ihnen ist ersichtlich, daß

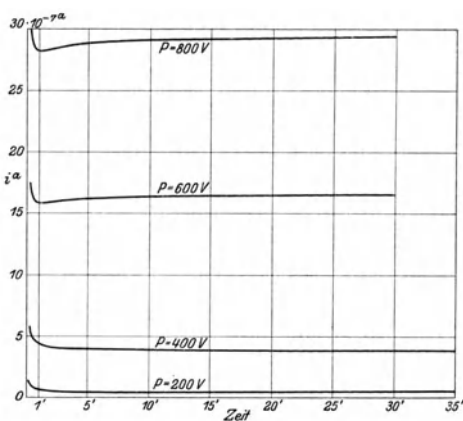


Fig. 4. Zeitlicher Verlauf des Stromes für Pilit Nr. 6.

der Charakter der Kurven für sämtliche Spannungen der nämliche ist.

Tabelle II.
Zeitlicher Verlauf des Stromes für Pilit Nr. 6.

Zeit	i^a für $P = 200$ V	i^a für $P = 400$ V	i^a für $P = 600$ V	i^a für $P = 800$ V
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1'	$0,654 \cdot 10^{-7}$	$4,43 \cdot 10^{-7}$	$15,8 \cdot 10^{-7}$	$28,3 \cdot 10^{-7}$
2'	$0,530 \cdot 10^{-7}$	$4,16 \cdot 10^{-7}$	$15,9 \cdot 10^{-7}$	$28,4 \cdot 10^{-7}$
3'	$0,480 \cdot 10^{-7}$	$4,09 \cdot 10^{-7}$	$16,0 \cdot 10^{-7}$	$28,5 \cdot 10^{-7}$
4'	$0,460 \cdot 10^{-7}$	$4,04 \cdot 10^{-7}$	$16,1 \cdot 10^{-7}$	$28,7 \cdot 10^{-7}$
5'	$0,449 \cdot 10^{-7}$	$4,01 \cdot 10^{-7}$	$16,2 \cdot 10^{-7}$	$28,8 \cdot 10^{-7}$
10'	$0,426 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$	$16,4 \cdot 10^{-7}$	$29,1 \cdot 10^{-7}$
15'	$0,425 \cdot 10^{-7}$	$3,84 \cdot 10^{-7}$	$16,45 \cdot 10^{-7}$	$29,2 \cdot 10^{-7}$
20'	$0,428 \cdot 10^{-7}$	$3,82 \cdot 10^{-7}$	$16,5 \cdot 10^{-7}$	$29,3 \cdot 10^{-7}$
25'	$0,430 \cdot 10^{-7}$	$3,81 \cdot 10^{-7}$	$16,5 \cdot 10^{-7}$	$29,4 \cdot 10^{-7}$
30'	$0,447 \cdot 10^{-7}$	$3,80 \cdot 10^{-7}$	$16,55 \cdot 10^{-7}$	$29,4 \cdot 10^{-7}$

3. Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur. Zunächst wurden einige Vorversuche durchgeführt. Mittels eines Bunsenbrenners wurden die Kupfer-Elektroden möglichst gleichmäßig bis etwa 45° C erwärmt. An beiden Elektroden war seitlich je ein Loch gebohrt, in welches ein genau hineinpassendes Thermometer gesteckt wurde, Fig. 5.

Es wurden nun die Ausschläge des Galvanometers als Funktion der Temperatur bei der Abkühlung der Elektroden bis zur niedrigsten Temperatur von etwa 17° C aufgenommen und an den Thermometern jeweils die dazugehörigen Temperaturen abgelesen. Es darf angenommen werden, daß das Dielektrikum den Temperaturänderungen der Elektroden genau mitfolgte.

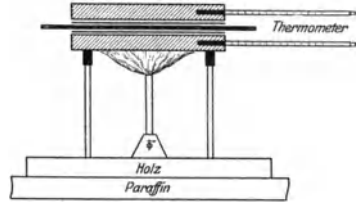


Fig. 5.

Bei diesen ersten Versuchen kühlten sich die Kupferelektroden in Zimmertemperatur, die jedesmal gemessen wurde durch Wärmeableitung an die Umgebung ab. Die Resultate dieser Vorversuche sind in Tabelle III kurz angegeben. Es ergab sich, daß die Leitfähigkeit sehr stark von der Temperatur abhängig ist. Der Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Temperatur läßt sich innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen durch folgende Gleichung darstellen:

$$K_t = K_0 \cdot e^{at}$$

wo K_t die Leitfähigkeit bei $t^\circ \text{C}$
 K_0 „ „ „ „ 0°C

und a eine Konstante des Materials bedeuten. Tabelle I enthält die Konstante a für Preßspan Nr. 1 bei verschiedenen Spannungen.

Tabelle III.

Spannung	Temperatur-Intervall	a
103 Volt	43° bis 17° C	0,0574
312 „	35° „ 16° C	0,0570
420 „	37° „ 17° C	0,0575
630 „	38° „ 20° C	0,0574
840 „	40° „ 21° C	0,0587
1050 „	40° „ 22° C	0,0567
1155 „	41° „ 18° C	0,0538
1235 „	40° „ 18° C	0,0514

Bei den weiteren Versuchen wurde von einer tieferen Temperatur angefangen, etwa von 4° bis 5° C. Diese Temperaturen konnten durch Abkühlen der oberen Elektrode mittels eines flachen Eiskastens, der unteren direkt mittels Eis erreicht werden. Als Isolator für diese Versuche wurde Preßspan Nr. 2 verwendet.

Die Schaltung der Anlage ist die nämliche wie bei den früheren Versuchen, nur wurde der Kommutator weggelassen, da jetzt der Stromdurchfluß nur nach der einen Richtung verfolgt wurde.

Es wurde im Kondensator- und Galvanometerkreis (Fig. 2) nun eine bestimmte Spannung eingeschaltet und mit der Temperatur durch gleichmäßiges Erwärmen der Kupfer-Elektroden allmählich von 5° C an hinaufgegangen. Dieselben wurden mit einem Bunsen-Brenner geheizt, und nach jeder Erwärmung wurde jeweils eine kleine Zeitlang gewartet, um sicher zu sein, daß die von den Thermometern angezeigte Temperatur dem Dielektrikum tatsächlich mitgeteilt war. Durch entsprechendes Regulieren der Gasflamme konnten kleinste Temperaturänderungen erhalten werden. Gleichzeitig mit der Temperatur wurde die Leitfähigkeit beobachtet, so daß der Verlauf der letzteren in Funktion der Temperatur aufgezeichnet werden konnte. Die Null-Lage am Galvanometer

wurde von Zeit zu Zeit verifiziert. Die Spannung wurde vor und nach dem Versuch gemessen; der Spannungsabfall war so klein, daß man sich später mit dem Messen nach jeder Versuchsreihe begnügte. Auf diese Weise wurde bis zu einer Temperatur von 35° C gegangen; von hier an wurde die Temperatur allmählich bis auf 5° C erniedrigt, um zu prüfen, ob die beiden Kurven zusammenfallen, oder ob sie eine Schleife bilden. In Tabelle IV und in Fig. 6 sind die Resultate dieser Versuchsreihen verzeichnet. Als Ordinaten sind in den Kurven die Logarithmen der Stromstärken, als Abszissen die zugehörigen Temperaturen gewählt. Die erhaltenen Kurven bilden eine Schleife ähnlich der Hysteresis-Schleife bei Eisen, sie verlaufen aber in umgekehrter Richtung nämlich in der Richtung des Uhrzeigers. Merkwürdigerweise bilden die Kurven eine fast geschlossene Figur. Diese Versuche wurden mehrereremal wiederholt, und zwar bei verschiedenen Spannungen, bei 620, bei 1240 und bei 1860 Volt; für diese Spannungen zeigen die Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf.

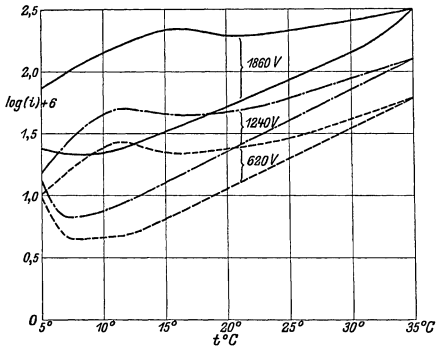


Fig. 6. Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur für Preßplan Nr. 2. Temperaturintervall 5 bis 35°.

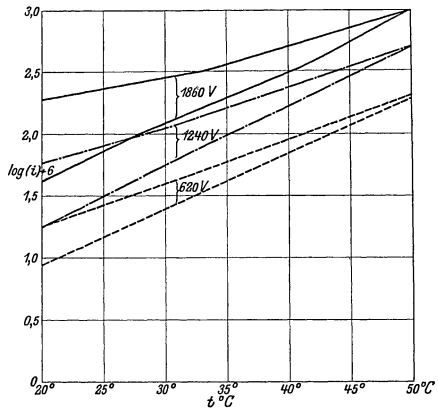


Fig. 7. Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur bei Preßspan Nr. 2. Temperaturintervall 20 bis 50°.

Die Kurven für 620 und 1240 Volt zeigen folgenden Verlauf:

Die aufsteigenden Kurven kann man in drei Teile teilen, und zwar: in dem ersten Teil von 5° bis 11,5°, wo die Leitfähigkeit zunimmt und bei 11,5° ein Maximum durchläuft. Im zweiten Teile von 11,5 bis 17° nimmt die Leitfähigkeit wenig ab, sie durchläuft bei 17° ein Minimum. Im dritten Teil von 17 bis 35° nimmt die Leitfähigkeit beständig zu.

Beiden absteigenden Kurven nimmt die Leitfähigkeit zunächst von 35° bis 8° ab, sodann von 8° bis 5° nimmt sie zu, sie durchläuft bei etwa 8° ein Minimum.

In ganz gleicher Weise wurden nun Untersuchungen zwischen 20° und 50° durchgeführt, deren Resultate durch die Tabelle V und Fig. 7 gegeben sind. Die Hysteresis-schleife ist gleich gerichtet wie die frühere, sie wird also im Sinne des Uhrzeigers durchlaufen. Die Abhängigkeit der Logarithmen der Leitfähigkeiten von den zugehörigen Temperaturen ist zwischen bestimmten Grenzen eine geradlinige.

Betrachten wir wieder die Gleichung

$$K_t = K_0 \cdot e^{at}$$

so ergeben sich folgende Werte für a:

Spannung	Temperatur - Grenzen	aufst. Kurve	abst. Kurve
618 Volt	30° bis 50°	0,0364	
618 „	50° „ 20°		0,0463
1238 Volt	30° bis 50°	0,0332	
1238 „	50° „ 20°		0,0485

Tabelle IV.
Leitfähigkeit in Funktion der Temperatur. Preßspan Nr. 2.
Temperaturintervall: $5^{\circ} \rightleftharpoons 35^{\circ}$.

P = 620 V			P = 1240 V			P = 1860 V		
T °C	i ^a	lg (i)	T °C	i ^a	lg (i)	T °C	i ^a	lg (i)
5 ⁰	1,02 · 10 ⁻⁵	1,008	5 ⁰	1,52 · 10 ⁻⁵	1,182	5 ⁰	7,40 · 10 ⁻⁵	1,869
8 ⁰	1,92 · 10 ⁻⁵	1,283	8 ⁰	3,29 · 10 ⁻⁵	1,517	8 ⁰	11,44 · 10 ⁻⁵	2,058
10 ⁰	2,08 · 10 ⁻⁵	1,318	10 ⁰	4,51 · 10 ⁻⁵	1,654	10 ⁰	14,90 · 10 ⁻⁵	2,173
12 ⁰	2,72 · 10 ⁻⁵	1,434	12 ⁰	5,03 · 10 ⁻⁵	1,702	12 ⁰	17,40 · 10 ⁻⁵	2,240
15 ⁰ 15	2,35 · 10 ⁻⁵	1,371	15 ⁰	4,55 · 10 ⁻⁵	1,658	15 ⁰	22,30 · 10 ⁻⁵	2,348
17 ⁰ 5	2,11 · 10 ⁻⁵	1,324	17 ⁰	4,41 · 10 ⁻⁵	1,644	17 ⁰ 15	21,90 · 10 ⁻⁵	2,340
20 ⁰	2,38 · 10 ⁻⁵	1,376	20 ⁰	4,64 · 10 ⁻⁵	1,666	20 ⁰	19,65 · 10 ⁻⁵	2,293
23 ⁰	2,67 · 10 ⁻⁵	1,426	22 ⁰	5,01 · 10 ⁻⁵	1,699	22 ⁰	19,78 · 10 ⁻⁵	2,296
25 ⁰	2,89 · 10 ⁻⁵	1,461	25 ⁰	5,94 · 10 ⁻⁵	1,774	25 ⁰	21,40 · 10 ⁻⁵	2,330
27 ⁰ 2	3,29 · 10 ⁻⁵	1,517	27 ⁰	6,88 · 10 ⁻⁵	1,838	28 ⁰	23,65 · 10 ⁻⁵	2,374
29 ⁰	3,82 · 10 ⁻⁵	1,582	29 ⁰	7,95 · 10 ⁻⁵	1,900	31 ⁰ 1	26,75 · 10 ⁻⁵	2,427
32 ⁰	4,84 · 10 ⁻⁵	1,685	32 ⁰	9,90 · 10 ⁻⁵	1,995	34 ⁰	31,10 · 10 ⁻⁵	2,493
35 ⁰	6,13 · 10 ⁻⁵	1,787	35 ⁰	12,7 · 10 ⁻⁵	2,104	35 ⁰	31,70 · 10 ⁻⁵	2,501
33 ⁰	4,85 · 10 ⁻⁵	1,686	33 ⁰	9,80 · 10 ⁻⁵	1,991	32 ⁰	17,66 · 10 ⁻⁵	2,247
30 ⁰	3,66 · 10 ⁻⁵	1,563	30 ⁰	6,94 · 10 ⁻⁵	1,841	30 ⁰	14,05 · 10 ⁻⁷	2,148
26 ⁰ 3	2,32 · 10 ⁻⁵	1,365	30 ⁰	5,02 · 10 ⁻⁵	1,700	26 ⁰	9,66 · 10 ⁻⁵	1,985
22 ⁰ 5	1,53 · 10 ⁻⁵	1,185	24 ⁰	3,55 · 10 ⁻⁵	1,550	22 ⁰	6,40 · 10 ⁻⁵	1,806
19 ⁰ 9	1,12 · 10 ⁻⁵	1,049	20 ⁰	2,26 · 10 ⁻⁵	1,354	20 ⁰	5,26 · 10 ⁻⁵	1,721
17 ⁰	0,800 · 10 ⁻⁵	0,903	17 ⁰	1,585 · 10 ⁻⁵	1,200	18 ⁰	4,23 · 10 ⁻⁵	1,626
14 ⁰ 5	0,612 · 10 ⁻⁵	0,787	14 ⁰ 55	1,185 · 10 ⁻⁵	1,074	16 ⁰	3,54 · 10 ⁻⁵	1,549
12 ⁰	0,492 · 10 ⁻⁵	0,692	13 ⁰	1,015 · 10 ⁻⁵	1,006	14 ⁰ 87	3,20 · 10 ⁻⁵	1,505
10 ⁰ 1	0,463 · 10 ⁻⁵	0,665	10 ⁰	0,761 · 10 ⁻⁵	0,881	12 ⁰	2,49 · 10 ⁻⁵	1,396
8 ⁰	0,451 · 10 ⁻⁵	0,654	8 ⁰	0,676 · 10 ⁻⁵	0,829	12 ⁰	2,24 · 10 ⁻⁵	1,350
7 ⁰	0,477 · 10 ⁻⁵	0,678	6 ⁰ 6	0,710 · 10 ⁻⁵	0,851	8 ⁰	2,115 · 10 ⁻⁵	1,325
5 ⁰ 1	0,902 · 10 ⁻⁵	0,955	5 ⁰ 4	1,05 · 10 ⁻⁵	1,021	5 ⁰	2,39 · 10 ⁻⁵	1,378

Tabelle V.
Leitfähigkeit in Funktion der Temperatur. Preßspan Nr. 2.
Temperaturintervall: $20^{\circ} \rightleftharpoons 50^{\circ}$.

P = 620 V			P = 1240 V			P = 1860 V		
T °C	i ^a	lg (i)	T °C	i ^a	lg (i)	T °C	i ^a	lg (i)
20 ⁰	1,79 · 10 ⁻⁵	1,253	20 ⁰	5,87 · 10 ⁻⁵	1,768	20 ⁰	18,9 · 10 ⁻⁵	2,276
23 ⁰	2,24 · 10 ⁻⁵	1,350	23 ⁰ 1	7,15 · 10 ⁻⁵	1,854	23 ⁰ 15	21,7 · 10 ⁻⁵	2,336
25 ⁰	2,67 · 10 ⁻⁵	1,426	25 ⁰	7,90 · 10 ⁻⁵	1,898	25 ⁰ 1	23,6 · 10 ⁻⁵	2,373
28 ⁰	3,38 · 10 ⁻⁵	1,529	28 ⁰ 1	9,13 · 10 ⁻⁵	1,960	27 ⁰	24,6 · 10 ⁻⁵	2,391
30 ⁰	3,94 · 10 ⁻⁵	1,595	30 ⁰	11,05 · 10 ⁻⁵	2,043	30 ⁰	28,4 · 10 ⁻⁵	2,453
33 ⁰	5,04 · 10 ⁻⁵	1,702	33 ⁰	13,73 · 10 ⁻⁵	2,138	33 ⁰ 1	34,0 · 10 ⁻⁵	2,531
35 ⁰	6,02 · 10 ⁻⁵	1,779	35 ⁰	16,08 · 10 ⁻⁵	2,206	35 ⁰ 4	37,2 · 10 ⁻⁵	2,570
38 ⁰	7,75 · 10 ⁻⁵	1,889	38 ⁰ 8	21,70 · 10 ⁻⁵	2,336	37 ⁰ 2	42,0 · 10 ⁻⁵	2,623
40 ⁰	9,16 · 10 ⁻⁵	1,962	40 ⁰	23,65 · 10 ⁻⁵	2,374	40 ⁰	51,0 · 10 ⁻⁵	2,707
43 ⁰	11,72 · 10 ⁻⁵	2,069	43 ⁰	30,10 · 10 ⁻⁵	2,478	42 ⁰	59,0 · 10 ⁻⁵	2,771
45 ⁰	13,82 · 10 ⁻⁵	2,140	45 ⁰	34,50 · 10 ⁻⁵	2,538	45 ⁰	72,3 · 10 ⁻⁵	2,859
47 ⁰	16,24 · 10 ⁻⁵	2,210	48 ⁰	44,65 · 10 ⁻⁵	2,650	47 ⁰	83,0 · 10 ⁻⁵	2,919
50 ⁰	20,55 · 10 ⁻⁵	2,313	50 ⁰	50,65 · 10 ⁻⁵	2,704	50 ⁰	101,0 · 10 ⁻⁵	3,004
47 ⁰	14,28 · 10 ⁻⁵	2,155	48 ⁰	40,30 · 10 ⁻⁵	2,605	47 ⁰ 9	77,0 · 10 ⁻⁵	2,886
46 ⁰	12,72 · 10 ⁻⁵	2,105	45 ⁰	28,24 · 10 ⁻⁵	2,450	45 ⁰	54,3 · 10 ⁻⁵	2,735
43 ⁰	9,30 · 10 ⁻⁵	1,968	43 ⁰	22,35 · 10 ⁻⁵	2,359	42 ⁰	39,2 · 10 ⁻⁵	2,593
40 ⁰	6,75 · 10 ⁻⁵	1,829	40 ⁰	16,19 · 10 ⁻⁵	2,209	40 ⁰	31,6 · 10 ⁻⁵	2,500
38 ⁰	5,10 · 10 ⁻⁵	1,707	37 ⁰	11,70 · 10 ⁻⁵	2,068	36 ⁰	21,9 · 10 ⁻⁵	2,340
35 ⁰	4,09 · 10 ⁻⁵	1,612	35 ⁰	9,38 · 10 ⁻⁵	1,972	35 ⁰	19,8 · 10 ⁻⁵	2,297
33 ⁰	3,38 · 10 ⁻⁵	1,529	33 ⁰ 5	8,18 · 10 ⁻⁵	1,913	31 ⁰ 9	14,8 · 10 ⁻⁵	2,170
30 ⁰	2,43 · 10 ⁻⁵	1,394	30 ⁰	5,69 · 10 ⁻⁵	1,755	30 ⁰	12,28 · 10 ⁻⁵	2,089
28 ⁰	2,07 · 10 ⁻⁵	1,316	28 ⁰	4,55 · 10 ⁻⁵	1,658	28 ⁰	10,23 · 10 ⁻⁵	2,010
26 ⁰	1,64 · 10 ⁻⁵	1,215	26 ⁰	3,57 · 10 ⁻⁵	1,553	25 ⁰ 6	8,02 · 10 ⁻⁵	1,904
24 ⁰ 1	1,32 · 10 ⁻⁵	1,120	25 ⁰	3,165 · 10 ⁻⁵	1,500	24 ⁰	6,68 · 10 ⁻⁵	1,825
21 ⁰ 6	1,01 · 10 ⁻⁵	1,004	22 ⁰	2,192 · 10 ⁻⁵	1,340	21 ⁰ 8	5,19 · 10 ⁻⁵	1,715
20 ⁰	0,86 · 10 ⁻⁵	0,935	20 ⁰	1,74 · 10 ⁻⁵	1,240	20 ⁰	4,25 · 10 ⁻⁵	1,628

Weitere Untersuchungen der Leitfähigkeit zwischen 5⁰ und 35⁰ C wurden nur noch mit einer Lamelle, Pilit Nr. 1, vorgenommen. Es zeigte sich hierbei, daß der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Leitfähigkeit der Dielektrika ganz bedeutend ist. Die Zimmer-Temperatur schwankte zwischen 16⁰ und 19⁰ C, sie war also viel höher wie die niedrigsten verwendeten Temperaturen, so daß sich die Feuchtigkeit des Raumes in größerer Menge auf die untersuchte Lamelle kondensierte, wodurch selbstverständlich selbst während des Versuches die Leitfähigkeit geändert wurde. Auf tiefere Temperaturen mußte deshalb verzichtet werden und die weiteren Versuche wurden nur noch zwischen den Temperaturen 20⁰ und 50⁰ C durchgeführt. Um den Einfluß der Feuchtigkeit zu verkleinern, wurden die Isolier-Platten in der schon beschriebenen Weise auf der erwärmten Messingplatte abgetrocknet, und zwar vor jedem Versuch.

Trotzdem aber waren die Resultate von verschiedenen Meßreihen an demselben Material nicht vollkommen die gleichen. Dies rührt hauptsächlich daher, weil es unmöglich ist, mit den oben erwähnten Mitteln das Dielektrikum immer im genau gleichen Feuchtigkeitzzustand zu erhalten. Ein Beweis, daß sich der Zustand wirklich ändert, ist folgender: Vor und nach dem Versuch wurde das Dielektrikum bis auf 0,001 g genau gewogen; nach dem Versuch war das Gewicht nicht mehr gleich demjenigen am Anfange der Messung. Nachfolgend einige Zahlenwerte:

Material	Gewicht vor	Gewicht nach dem Versuch
Pilit Nr. 2	24,828 g	24,800 g
Pilit Nr. 2	24,800	24,775
Pilit Nr. 3	25,170	25,142
Pilit Nr. 4	33,165	33,115
Pilit Nr. 4	32,910	32,890
Preßspan Nr. 3	24,090	24,041

Aus dieser Zusammenstellung ist ersichtlich, daß durch das Erwärmen auf die höheren Temperaturen etwas Feuchtigkeit vom Dielektrikum verdampft wird.

Es wurde zunächst Pilit Nr. 1 im Temperaturintervall von 20⁰ bis 50⁰ C bei den Spannungen 830, 1660 und 2480 Volt untersucht; die Kurven der Leitfähigkeit in Funktion der Temperatur zeigen einen ganz ähnlichen Charakter. Ferner kamen noch neun weitere Materialien zur Untersuchung, und zwar sowohl bei steigender Temperatur von 20⁰ bis 50⁰ C wie auch bei fallender von 50⁰ bis 20⁰ C. Alle erhaltenen Zusammenhänge der Leitfähigkeiten mit den Temperaturen sind nahezu exponentielle; die Logarithmen der Leitfähigkeiten, aufgetragen in Funktion der Temperatur, ergaben mit großer Annäherung eine Gerade. Drückt man den Zusammenhang durch die schon betrachtete Gleichung

$$K_t = K_0 \cdot e^{at}$$

aus, so ergaben sich folgende Werte für a bei steigender Temperatur zwischen 20⁰ und 50⁰ C:

Spannung	Material	a
210 Volt	Pilit Nr. 4	0,0595
209 „	Pilit Nr. 3	0,0576
209 „	Pilit Nr. 3	0,0585
390 „	Pilit Nr. 2	0,0564
420 „	Pilit Nr. 2	0,0550
830 „	Pilit Nr. 6	0,0381

Die Kurven der Leitfähigkeit für steigende Temperatur und diejenigen für abnehmende fallen nicht zusammen, sie bilden eine Schleife, im allgemeinen im Sinne des Uhrzeigers gerichtet.

Tabelle VI.
Leitfähigkeit in Funktion der Temperatur.

t° C	Pilit Nr. 2 P = 419 Volt	Pilit Nr. 3 P = 417 Volt	Pilit Nr. 3a P = 418 Volt	Pilit Nr. 4 P = 210 Volt	Pilit Nr. 5 P = 210 Volt	Preßspan Nr. 3 P = 210 Volt	Preßspan Nr. 4 P = 416 Volt	Preßspan Nr. 6 P = 210 Volt
20 ⁰	0,436 · 10 ⁻¹³	0,45 · 10 ⁻¹³	0,22 · 10 ⁻¹³	0,29 · 10 ⁻¹³	1,04 · 10 ⁻¹³	0,58 · 10 ⁻¹⁴	0,22 · 10 ⁻¹³	1,64 · 10 ⁻¹³
25 ⁰	1,01 · 10 ⁻¹³	1,02 · 10 ⁻¹³	0,49 · 10 ⁻¹³	0,58 · 10 ⁻¹³	2,13 · 10 ⁻¹³	1,04 · 10 ⁻¹⁴	0,53 · 10 ⁻¹³	3,42 · 10 ⁻¹³
30 ⁰	2,08 · 10 ⁻¹³	2,20 · 10 ⁻¹³	1,05 · 10 ⁻¹³	1,33 · 10 ⁻¹³	2,98 · 10 ⁻¹³	1,81 · 10 ⁻¹⁴	1,17 · 10 ⁻¹³	6,64 · 10 ⁻¹³
35 ⁰	4,25 · 10 ⁻¹³	4,32 · 10 ⁻¹³	2,10 · 10 ⁻¹³	2,94 · 10 ⁻¹³	8,77 · 10 ⁻¹³	3,07 · 10 ⁻¹⁴	2,35 · 10 ⁻¹³	11,70 · 10 ⁻¹³
40 ⁰	9,15 · 10 ⁻¹³	9,03 · 10 ⁻¹³	4,33 · 10 ⁻¹³	5,97 · 10 ⁻¹³	10,8 · 10 ⁻¹³	5,22 · 10 ⁻¹⁴	4,91 · 10 ⁻¹³	21,3 · 10 ⁻¹³
45 ⁰	18,1 · 10 ⁻¹³	17,4 · 10 ⁻¹³	8,75 · 10 ⁻¹³	11,9 · 10 ⁻¹³	15,1 · 10 ⁻¹³	8,68 · 10 ⁻¹⁴	9,34 · 10 ⁻¹³	36,6 · 10 ⁻¹³
50 ⁰	36,1 · 10 ⁻¹³	31,3 · 10 ⁻¹³	14,7 · 10 ⁻¹³	22,6 · 10 ⁻¹³	25,8 · 10 ⁻¹³	13,8 · 10 ⁻¹⁴	18,3 · 10 ⁻¹³	59,9 · 10 ⁻¹³

Von den zahlreich ausgeführten Versuchsreihen gebe ich vorstehend eine Auswahl für acht Isolationsmaterialien. Tabelle VI enthält für die verschiedenen Isolatoren die Werte der Leitfähigkeit K (Ohm/cm) in Funktion der Temperatur.

Wie aus ihr ersichtlich ist, sind die Leitfähigkeiten der verschiedenen Pilit- bzw. Preßspan-Sorten sehr verschieden. Man kann daher nicht allgemein sagen, daß Pilit oder Preßspan bei einer bestimmten Temperatur eine gegebene Leitfähigkeit hat, die Leitfähigkeiten für bestimmte Temperaturen hängen von der inneren Beschaffenheit des betreffenden Fabrikates wesentlich ab. Fig. 8 stellt den Zusammenhang für Pilit No. 2 graphisch dar.

4. Leitfähigkeit als Funktion der Feuchtigkeit. Durch folgende Versuche sollte der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Leitfähigkeit genauer geprüft werden. Es wurde eine Lamelle bei verschiedenen Feuchtigkeitsgraden untersucht; zuerst wurde die Platte Pilit Nr. 1 sorgfältig auf der erwärmten Messingplatte abgetrocknet, gewogen und von 20° bis 50° C untersucht und abermals gewogen. Dann gab ich die Lamelle in einen feuchten Raum, und nach 24stündigem Verweilen in demselben wurde sie wieder vor und nach der Untersuchung gewogen und zwischen 20° und 50° C untersucht. Durch wiederholtes Aussetzen in dem feuchten Raum erhielt man eine größte Feuchtigkeits-Zunahme von ungefähr 1 g. Der Rand der Lamelle wurde vor jeder Untersuchung, um eine oberflächliche Leitfähigkeit zu verhindern, sorgfältig mit einem trockenen Tuch gereinigt.

Bei jedem Zustand des Dielektrikums wurden vier Werte der Leitfähigkeit, und zwar bei 20°, 30°, 40° und 50° C gemessen. Nun wurden alle bei 20° C erhaltenen Resultate zusammengestellt, das nämliche geschah für die bei 30°, 40° und 50° C erhaltenen.

Auf diese Weise konnten Kurven aufgestellt werden, die die Leitfähigkeit bei konstanten Temperaturen und variablem Feuchtigkeitsgehalt angeben.

Der Unterschied des Gewichtes vor und nach der Untersuchung wurde auf die verschiedenen Temperaturen verteilt, und zwar proportional den Temperaturänderungen. Es sei z. B. das Gewicht vor der Untersuchung bei 20° C = g₀ und nach derselben bei 50° C = g₁, dann berechnet man die Gewichte für die verschiedenen Temperaturen zu:

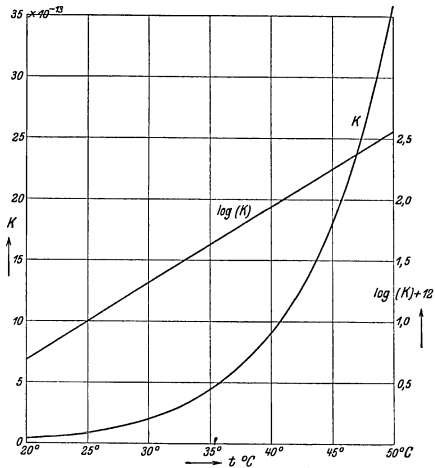


Fig. 8. Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur für Pilit Nr. 2.

- für 20° g₀
- „ 30° g₀ — $\frac{g_0 - g_1}{30} \cdot 10$
- „ 40° g₀ — $\frac{g_0 - g_1}{30} \cdot 20$
- „ 50° g₁

Das Gewicht g₀ erhielt ich, wie schon oben gesagt, nach einer sorgfältigen Abtrocknung des Dielektrikums; es betrug 50,155 g bei einer Temperatur von 20° C. Bei der nämlichen Temperatur war das größte erhaltene Gewicht nach mehrmaligem Aussetzen der Lamelle in den feuchten Raum 51,115 g. Die gesamte Feuchtigkeitszunahme bei 20° beträgt somit 0,960 g.

In nachfolgender Tabelle No. VII sind die Resultate dieser Versuche verzeichnet und in der Fig. 9 graphisch dargestellt, und zwar für jede der Temperaturen 20°, 30°, 40° und 50° C. Diese Kurven zeigen unter sich einen ähnlichen Verlauf, sie haben hyperbolischen Charakter.

Die Änderungen des spezifischen Widerstandes mit dem Feuchtigkeitsgehalt sind sehr beträchtlich, insbesondere bei niedrigen Temperaturen.

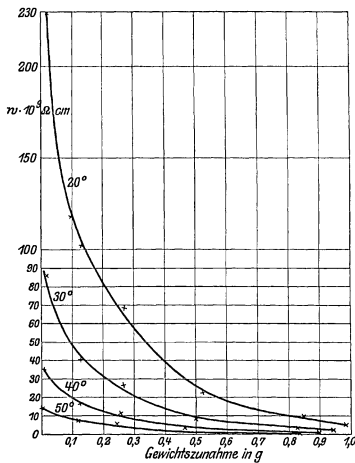


Fig. 9. Spezifischer Widerstand als Funktion der Feuchtigkeit bei Pilit Nr. 1 (Spannung 825 Volt).

Tabelle VII.
Spez. Widerstand in Funktion der Feuchtigkeitszunahme.

t = 20°		t = 30°	
Gewichtszunahme	ω · 10 ⁹	Gewichtszunahme	ω · 10 ⁹
0,020	229,5	0,015	85,6
0,129	101,7	0,127	40,2
0,269	68,7	0,263	27,0
0,521	22,5	0,497	8,50
0,845	9,30	0,825	3,90
0,980	5,04	0,913	2,12

t = 40°		t = 50°	
Gewichtszunahme	ω · 10 ⁹	Gewichtszunahme	ω · 10 ⁹
0,008	35,0	0	14,0
0,124	16,7	0,119	7,47
0,255	11,5	0,244	5,24
0,404	3,58	0,423	1,68
0,798	1,68	0,765	0,769
0,894	0,984	0,833	0,499

5. Die Leitfähigkeit als Funktion der Potential-Differenz. Von der Hochspannungs-Batterie wurde ein Strom durch das Dielektrikum geschickt und mit dem Galvanometer gemessen. Zirka 2 Minuten nach dem Einschalten wurde abgelesen, da aus den Kurven des zeitlichen Verlaufs zu entnehmen ist, daß der Strom nach dieser Zeit als konstant angenommen werden darf. Die Null-Lage wurde nach jeder Ablesung verifiziert und wenn nötig eine Korrektur angebracht.

Die Anordnung der Meßschaltung zeigt Figur 10:

Um den ersten großen Ausschlag, der durch die Ladung des Kondensators auftritt, und der eine zu große Verdrehung des Spiegels herbeiführen würde, zu beseitigen, wurde zuerst der Kondensator mit den Polen der Batterie kurzgeschlossen (Schalter in Stellung I), dann erst wurde das Galvanometer in den Stromkreis gebracht durch Umlegen des Schalters

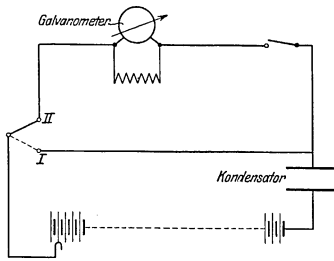


Fig. 10.

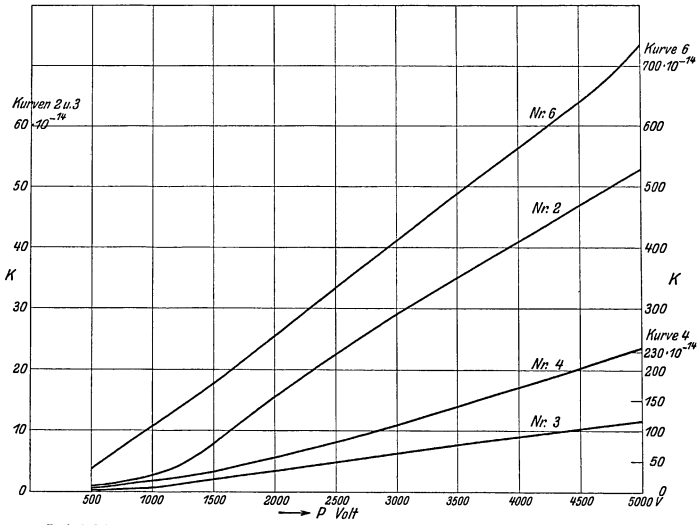


Fig. 11. Leitfähigkeit als Funktion der Spannung für die Pilot-Sorten Nr. 2, 3, 4 und 6.

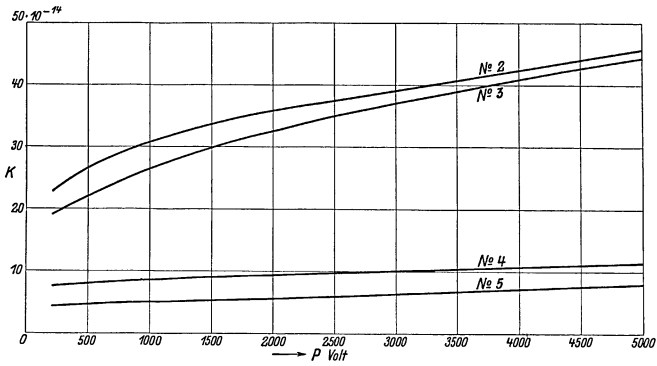


Fig. 11a. Leitfähigkeit als Funktion der Spannung für die Pressspan-Sorten Nr. 2 bis Nr. 5.

in Stellung II. Die zur Verfügung stehende Akkumulatoren-Batterie gestattete Spannungen bis 5200 Volt in Stufen von je 100 zu 100 Volt anzuwenden.

Es wurden als Vorversuche kleinere Versuchsreihen bis zu einer Höchstspannung von ca. 1000 Volt gemacht. Die erhaltenen Resultate wurden in Kurven zusammengestellt, indem die verschiedenen Potentialdifferenzen als Abszissen und die Ausschläge als Ordinaten aufgetragen wurden. Diese Kurven zeigen einen scheinbar parabolischen Verlauf.

In diesen und allen übrigen Untersuchungen wurden alle Teile der Anlage auf das peinlichste isoliert, da der kleinste Isolationsfehler bereits große Störungen verursachen würde.

Die ersten Versuche wurden mit Platten, die sich im gewöhnlichen feuchten Zustande befanden, durchgeführt. Einige Lamellen wurden vor dem Versuch durch Erwärmen teilweise abgetrocknet. Feuchtigkeit war aber noch immer im Dielektrikum vorhanden, so daß die erhaltenen Leitfähigkeiten nicht nur den Eigenschaften des Materials selbst entsprachen, sondern auch dem Wassergehalt desselben. Es mußten deshalb, um vergleichbare Resultate zu bekommen, die Lamellen im vollkommen trockenen Zustand untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden sie einige Tage lang in einem abgeschlossenen Glasgefäß liegen gelassen, in dem die Luft mittels Phosphorsäureanhydrid abgetrocknet war; das Gefäß wurde mit einer Glasplatte hermetisch geschlossen. Nach einigen Tagen wurde die Lamelle herausgenommen, mit den beiden Kupferelektroden versehen und in ein anderes Gefäß gebracht. Die Anordnung ist genau die gleiche wie die früher beschriebene; nur ist noch das Glasgefäß vorhanden, welches mit einem Ebonitdeckel abgeschlossen war. Die Luft im Gefäß wurde mittels Phosphorsäureanhydrid getrocknet. Die Einführung der Zuleitung geschah durch den Deckel, der mit zwei Löchern versehen war; diese Öffnungen wurden mittels zweier Paraffinstöpsel, durch welche die Drähte geführt wurden, verschlossen. Auf diese Weise erhielt ich einen konstanten trockenen Zustand des Dielektrikums, also Unabhängigkeit von dem Feuchtigkeitszustand der Zimmerluft. Trotzdem waren von Tag zu Tag die Resultate nicht vollkommen die gleichen; diese Veränderungen der Leitfähigkeit können auch nicht von Temperaturänderungen herrühren, da die Zimmertemperatur im allgemeinen bei einer gleichen Reihe von Untersuchungen sehr konstant war.

Die für die verschiedenen Materialien zusammengestellten Resultate finden sich in Fig. 11 und Fig. 11 a aufgetragen. Tabelle No. VIII enthält die Werte der Leitfähigkeit bei den Spannungen 500 V, 1000 V, 1500 V usw. bis 5000 V. Die Leitfähigkeiten sind Mittelwerte aus je mehreren Versuchsreihen.

An den Kurven ist ersichtlich, daß die Änderung der Leitfähigkeit mit größer werdender Spannung größer wird. Diese Zunahme ist sehr stark, speziell bei den Pilit-Sorten, bei denen die Kurven einen parabolischen Verlauf zeigen. Für die Preßspan-Sorten verlaufen die Kurven viel flacher, sie nähern sich einer geraden Linie.

Tabelle VIII
Spez. Leitfähigkeit in Funktion der Spannung.

Spannung	Pilit Nr. 2 bei t = 17 ^o	Pilit Nr. 3 bei t = 17,5 ^o	Pilit Nr. 4 bei t = 16,8 ^o	Pilit Nr. 6 bei t = 17 ^o	Preßspan Nr. 2 bei t = 17,5 ^o	Preßspan Nr. 3 bei t = 17,8 ^o	Preßspan Nr. 4 bei t = 16,9 ^o	Preßspan Nr. 5 bei t = 16,2 ^o
	K. 10 ¹⁴	K. 10 ¹⁴	K. 10 ¹⁴	K. 10 ¹⁴	K. 10 ¹⁴	K. 10 ¹⁴	K. 10 ¹⁴	K. 10 ¹⁴
500 V	0,859	0,229	5,63	37,2	26,6	22,0	8,05	4,65
1000	2,71	0,675	17,8	106,1	30,7	26,4	8,56	5,02
1500	7,83	2,02	33,1	176,8	33,7	29,8	9,07	5,28
2000	15,6	3,43	56,0	253,9	35,6	32,4	9,44	5,55
2500	22,4	4,86	80,8	334,7	37,4	35,0	9,77	5,92
3000	29,0	6,37	109,1	412,3	39,1	36,9	10,0	6,30
3500	35,2	7,74	139,0	489,3	40,7	39,0	10,4	6,69
4000	40,99	9,05	170,2	560,0	42,4	40,9	10,7	7,07
4500	46,9	10,3	202,1	638,5	44,0	42,7	11,0	7,52
5000	52,8	11,5	236,5	735,0	46,0	44,3	11,3	7,98

Dielektrizitäts-Konstante der Isolatoren in Funktion der Potential-Differenz.

Meßmethode. Es wurde folgende Anordnung zur Messung der elektrischen Ladung getroffen:

In Stellung I der Wippe wird der Kondensator eine Zeitlang geladen; in Stellung II wird er durch das Galvanometer entladen. Es wurde der erste Ausschlag des Galvanometers abgelesen.

Um den Meßbereich zu vergrößern, mußte der Nebenschluß des Galvanometers verkleinert werden. Das Galvanometer wurde für jeden verwendeten Nebenschluß genau geeicht.

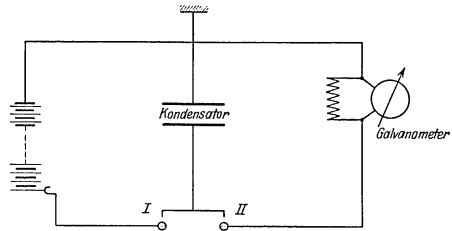


Fig. 12.

Die Eichung geschah mittels eines Normalelementes von Clark und eines Normal-Glimmerkondensators von Siemens & Halske. Dieser wurde während 30'' geladen, dann durch das Galvanometer entladen. Sei die gewählte Kapazität des Glimmerkondensators c , s der erste Ausschlag am Galvanometer, q die gemessene Ladung, G die Galvanometerkonstante und p die Spannung des benutzten Clark-Elementes, so wird:

$$q = p \cdot c = s \cdot G.$$

Hieraus berechnet man G für eine bestimmte Größe des Nebenschlusses am Galvanometer. Bei jedem verwendeten Nebenschluß wurden mehrere Messungen mit verschiedenen Kapazitäten und verschiedenen Spannungen vorgenommen, um zu prüfen, ob diese Galvanometerkonstante von der Größe des Ausschlages abhängig ist. Die erhaltenen Werte zeigen, daß bei einem bestimmten Nebenschluß am Galvanometer G als konstant angenommen werden kann.

Die einzelnen Teile der Leitungen und die Batterie waren voneinander sehr gut isoliert, um beim Entladen keinen Strom von der Batterie her zu bekommen.

Zeitlicher Verlauf der Ladung. Durch diese Versuche sollte geprüft werden, wie lange die Ladung der aus den zu untersuchenden Isolationsmaterialien gebildeten Kondensatoren dauern mußte, um dieselben vollständig zu laden. Der zu beobachtende Kondensator wurde für die Zeitdauer einer Sekunde geladen, dann entladen und der Ausschlag am Galvanometer abgelesen. Hierauf wurde der Kondensator für die Zeitdauer von zwei Sekunden geladen, dann entladen und der Ausschlag notiert usw. Von der Ladungsdauer 5'' an wurde in Stufen von 5'' und von der Ladungsdauer 30'' in Stufen von 10'' weitergegangen, insgesamt wurde Ladungsdauer bis zu 80'' verwendet. Die Ladungsspannung betrug 105 V. Diese Untersuchungen ergaben, daß die verwendeten Preßspan- und Pilitkondensatoren nach 30'' bereits vollkommen geladen sind.

Dielektrizitäts-Konstante in Funktion der Spannung. Es sei Q die zu messende Ladungsmenge des untersuchten Kondensators, C seine Kapazität, P die benutzte Spannung; es ist dann

$$Q = P \cdot C.$$

Q ist gegeben durch den ersten Ausschlag des Galvanometers, es sei dieser S , und die Galvanometerkonstante für den gewählten Nebenschluß G , somit

$$Q = G \cdot S.$$

Es ergibt sich nun ohne weiteres die Kapazität des Kondensators zu

$$C = \frac{Q}{P}.$$

Als erster wurde ein Hohlzylinder von folgenden Dimensionen untersucht:

Innerer Durchmesser	$\rho_1 = 150$ mm
Äußerer „	$\rho_2 = 153,07$ mm
Höhe	$h = 202$ mm.

Er bestand aus gepreßtem, mit wenig Öl und etwas fein zerpulvertem Glimmer vermishten Papier. Der Zylinder wurde in- und auswendig mit Stanniolektroden versehen; ein kleiner Rand wurde frei gelassen, so daß die Entfernung beider Elektroden längs der Oberfläche etwa 8—9 mm betrug.

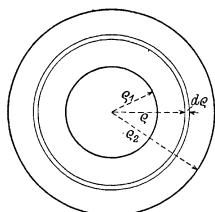


Fig. 13.

Der Zylinder wurde auf 3 sorgfältig gereinigte, 5 cm hohe Paraffinplatten gestellt. Um bei den hohen verwendeten Spannungen eine Randoberflächenleitung zu verhindern, wurden die Ränder sorgfältig mit Schellack einige Male bestrichen. Es wurde dadurch eine ausgezeichnete Isolierung erreicht.

Es wurde mit einer Spannung von 100 V angefangen und in Stufen von je 200 V bis ca. 2600 V gegangen. Wegen des Spannungsabfalls der Akkumulatoren wurden für jede Spannung nur 3 Ablesungen gemacht. Dieser Versuch wurde wiederholt, und zwar auch für kleinere Spannungsintervalle.

Um die Dielektrizitätskonstante für dieses Material zu berechnen, betrachten wir einen Querschnitt durch den Zylinder (siehe Fig. 13). Bedeutet δ die Dielektrizitäts-Konstante, so ist der dielektrische Verschiebungswiderstand für ein hohlzylindrisches Element des Dielektrikums von der Dicke d ρ :

$$S_d = \frac{d \rho}{2 \pi \rho \cdot h \cdot \delta}.$$

Der dielektrische Verschiebungswiderstand für den ganzen Zylinder wird also:

$$S_d = \int_{\rho_1}^{\rho_2} \frac{d \rho}{2 \pi \rho \cdot h \cdot \delta} = \frac{1}{2 \pi \cdot h \cdot \delta} \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)$$

und die Kapazität des Zylinders:

$$C = \frac{1}{4 \pi} \cdot \frac{1}{S_d} = \frac{1}{4 \pi} \cdot \frac{2 \pi \cdot h \cdot \delta}{\ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)}$$

$$C = \frac{h \cdot \delta}{2 \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)}.$$

Setzt man h in cm ein und bezieht man δ auf Luft, so wird C in absoluten CGS-Einheiten des elektrostatischen Maßsystems erhalten.

Es sei für die Kapazität N Mikrofarad gefunden worden, dann ist

$$c = \frac{h^{cm} \cdot \delta}{2 \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)} = 9 \cdot 10^5 \cdot N^{MF}.$$

Daraus findet man:

$$\delta = 9 \cdot 10^5 \cdot N^{MF} \cdot 2 \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \cdot \frac{1}{h^{cm}}.$$

Die so berechneten Werte der Dielektrizitätskonstante sind in Funktion der mittleren Beanspruchung des Dielektrikums $= \frac{P}{\rho_2 - \rho_1}$ in Tabelle IX zusammengestellt.

Tabelle IX.

P	$\frac{P}{\rho_2 - \rho_1}$	δ
105 V	342 V/cm	4,745
209	680	4,730
450	1370	4,680
629	2050	4,700
837	2720	4,730
1045	3400	4,705
1255	4100	4,730
1464	4770	4,655
1673	5450	4,665
1881	6130	4,655
2089	6800	4,655
2297	7480	4,685
2610	8500	4,675

Wir sehen aus obigem, daß die Dielektrizitätskonstante bis auf Beanspruchungen des Dielektrikums von 8500 V/cm als konstant zu betrachten ist; die kleinen Abweichungen dürften von Versuchsfehlern herrühren.

Mit genau gleicher Meßanordnung wurden auch die anderen Dielektrika, die in Form rechteckiger Lamellen vorlagen, untersucht. Die Kapazität berechnet sich bei diesen aus der Gleichung

$$C = \frac{F \cdot \delta}{4\pi \cdot l},$$

wo F = die Elektrodenfläche in cm², l = die Lamellendicke in cm und C die Kapazität in absoluten CGS-Einheiten des elektrostatischen Maßsystems bedeuten. Bezeichnet man wiederum die in MF gemessene Kapazität mit N, so wird

$$\delta = 9 \cdot 10^5 \cdot N^{MF} \cdot 4\pi \cdot \frac{1\text{cm}}{F\text{cm}^2}.$$

Einige der Lamellen wurden im gewöhnlichen feuchten Zustand untersucht, andere dagegen im mittels Phosphorsäure getrockneten Glasgefäß. Die mit feuchten Materialien erhaltenen Resultate sind, wie es zu erwarten war, ganz verschieden von denjenigen, die mit getrockneten Isolatoren bestimmt wurden. Als Beispiel seien die Resultate, die mit der Pilitorte Nr. 2 erhalten wurden, in folgendem gegeben:

Pilit Nr. 2 ergab im vollkommen trockenen Zustand als Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätskonstante und dem Ladepotential Konstanz bis etwa 3200 V, für höhere Ladepotentiale steigt die Dielektrizitätskonstante ein wenig. Sie betrug dabei bis zum Ladepotential von 3200 V

$$\delta = \underline{3,45}.$$

Eine Wiederholung des Versuches ergab

$$\delta = \underline{3,49}.$$

Das gleiche Material, untersucht im feuchten Zustand, ergab einen viel größeren Wert der Dielektrizitätskonstante; dieser war nicht konstant, sondern stieg von einem Anfangswert $\delta = 8,74$ bis zu einem Höchstwert $\delta = 10,150$ bei ca. 1000 V an. Von hier ab nimmt δ beständig ab bis zu einem Wert $\delta = 7,35$ bei einer Spannung von 2600 V. Der große Wert der Dielektrizitätskonstante und ihre Inkonzanz sind jedenfalls dem Feuchtigkeitsgehalt der Lamelle zuzuschreiben.

In Tabelle X sind die Resultate sämtlicher Untersuchungen, die an den verschiedenen Isolatoren im trockenen Zustande vorgenommen wurden, verzeichnet. Aus ihr ist er-

sichtlich, daß die Dielektrizitätskonstante für Pilit Nr. 2 bis auf eine Beanspruchung von 39 000 V/cm vollkommen konstant ist, bei höheren Beanspruchungen steigt die Dielektrizitätskonstante ein wenig. Für Preßspan Nr. 4 wurde bis auf Beanspruchungen von ca. 40 000 V/cm vollkommene Konstanz für die Dielektrizitätskonstante gefunden. Die beiden Isolationsmaterialien Preßspan Nr. 2 und Nr. 3 zeigen ein stetiges Anwachsen der Dielektrizitätskonstante mit der Beanspruchung, und zwar ändert sich dieselbe für Preßspan Nr. 2 von 5,73 bei einer Beanspruchung von 2050 V/cm bis auf 8,14 bei einer solchen von 47 150 V/cm; für Preßspan Nr. 3 war die Änderung kleiner, die Dielektrizitätskonstante stieg von 4,253 bei 3760 V/cm Beanspruchung des Dielektrikums bis auf 4,95 bei 52 640 V/cm Beanspruchung.

Tabelle X.

Dielektrizitätskonstante in Funktion der mittleren elektrischen Beanspruchung.

Spannung P	Pilit Nr. 2 bei $t = 17,4^{\circ} \text{C}$		Preßspan Nr. 4 bei $t = 17,2^{\circ} \text{C}$		Preßspan Nr. 2 bei $t = 17,2^{\circ} \text{C}$		Preßspan Nr. 3 bei $t^{\circ} = 17,3^{\circ} \text{C}$	
	P/l	δ	P/l	δ	P/l	δ	P/l	δ
V	V/cm		V/cm		V/cm		V/cm	
200	2 600	3,49	2 065	5,946	2 050	5,730	3 760	4,253
400	5 200	3,49	4 130	5,946	4 100	6,140	7 520	4,260
600	7 800	3,49	6 200	5,946	6 150	6,330	11 280	4,270
800	10 400	3,49	8 260	5,946	8 200	6,510	15 040	4,360
1000	13 000	3,49	10 320	5,946	10 250	6,670	18 800	4,445
1200	15 600	3,49	12 390	5,946	12 300	6,855	22 560	4,535
1400	18 200	3,49	14 460	5,946	14 350	6,935	26 320	4,562
1600	20 800	3,49	16 520	5,946	16 400	7,030	30 080	4,620
1800	23 400	3,49	18 590	5,946	18 450	7,175	33 840	4,650
2000	26 000	3,49	20 650	5,946	20 500	7,290	37 600	4,721
2200	28 600	3,49	22 720	5,946	22 550	7,385	41 360	4,760
2400	31 200	3,49	24 780	5,946	24 600	7,480	45 120	4,825
2600	33 800	3,49	26 850	5,946	26 650	7,550	48 880	4,890
2800	36 400	3,49	28 910	5,946	28 700	7,630	52 640	4,950
3000	39 000	3,49	30 980	5,946	30 750	7,665	—	—
3200	41 600	3,49	33 040	5,946	32 800	7,750	—	—
3400	44 200	3,497	35 100	5,946	34 850	7,815	—	—
3600	46 800	3,510	37 170	5,946	36 900	7,875	—	—
3800	49 400	3,552	39 240	5,946	38 950	7,930	—	—
4000	52 000	3,580	—	—	41 000	7,980	—	—
4200	—	—	—	—	43 050	8,015	—	—
4400	—	—	—	—	45 100	8,095	—	—
4600	—	—	—	—	47 150	8,140	—	—

Zum Schluß möchte ich ein ehrfurchtsvolles Andenken aus Dankbarkeit meinem leider zu früh und so plötzlich dahingeschiedenen Professor Herrn Dr. H. F. Weber widmen, welcher mir bei der vorliegenden Arbeit sowie während meiner gesamten Studienzeit in besonders zuvorkommender Weise behilflich war.

Lebenslauf.

Als Sohn des Cavre F. Tedeschi aus Kairo wurde der Verfasser am 25. Dezember 1886 in Kairo geboren. Bis zum Jahre 1899 erhielt er Privatunterricht und besuchte hierauf die deutsche Schule in Kairo; im September 1902 trat er in das „Collège de Khoronfesoh“ in Kairo ein, an welcher Anstalt er nach zweijähriger Vorbereitung die Matura mit bestem Erfolg ablegte.

Nach einer mehrmonatigen Tätigkeit in einem Bankgeschäft in Kairo entschloß er sich aber, sich dem technischen Studium zu widmen, und siedelte zu diesem Zwecke nach Zürich über, wo er im Oktober 1906 als regulärer Studierender in die Eidgenössische Technische Hochschule eintrat. Hier bestand er 1908 mit Erfolg die ersten Übergangsdiplom-Prüfungen und hörte dann die Vorlesungen der Professoren H. F. Weber, A. Stodola, Fliegner, Práßl, Wyssling, Farny und bildete sich speziell auf dem Gebiete der Elektrotechnik aus. Im Sommer 1910 wurde ihm auf Grund der mit Erfolg bestandenen Prüfungen und nach Einreichung einer Diplom-Arbeit über „Untersuchungen an einem Oerlikoner polumschaltbaren Drehstrommotor“ das Diplom eines Maschinen-Ingenieurs erteilt.

Auf Anregung des Herrn Professor H. F. Weber befaßte er sich im Physikalischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule vom Oktober 1910 an bis Oktober 1912 mit beiliegender Inaugural-Arbeit zur Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften.

Gleichzeitig war er als Assistent des Herrn Prof. A. Weber und später des Herrn Prof. W. Kummer tätig
