Untersuchungen über das dielektrische Verhalten flüssiger Isolierstoffe bei hohen Wechselspannungen.

Von

L. Pungs, Charlottenburg.

1. Einleitung. Während die dielektrischen Eigenschaften fester Isolatoren bei hohen Wechselspannungen in der technischen Literatur neuerdings mehrfach behandelt wurden, ist über das Verhalten flüssiger Isolierstoffe in bezug auf die auftretenden Verluste und die Dielektrizitätskonstante bei hohen dielektrischen Beanspruchungen nur wenig bekannt geworden. Der Verfasser hat auf Anregung von Herrn Professor Dr.-Ing. Petersen im Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Darmstadt eine Reihe von Untersuchungen angestellt, welche einen Beitrag zur Klärung des Verhaltens technisch verwendeter Isolieröle unter den obengenannten Bedingungen bilden sollten. Die Untersuchungen wurden mit Hilfe des Elektrometers ausgeführt, und zwar in der von Petersen (Archiv für El., Bd. 1, S. 95 u. f.) angegebenen Schaltung.

In der vorliegenden Arbeit sollen nur die endgültigen Resultate dieser Untersuchungen mitgeteilt werden; über die ziemlich zeitraubenden Vorversuche, welche den Zweck hatten, die Verwendbarkeit des Elektrometers und der Schaltung für die Messung kleiner Effekte bei sehr großen Phasenverschiebungen (Leistungsfaktor von einigen Tausendsteln) nachzuweisen, ist in der Dissertation des Verfassers „Über das dielektrische Verhalten flüssiger Isolierstoffe bei hohen Wechselspannungen“ berichtet; an der gleichen Stelle ist auch die Justierung des Elektrometers im Anschluß an die Veröffentlichungen von Orlich und Schultze²⁾ eingehend behandelt.

2. Versuchsanordnung. Für die Untersuchungen wurde ein Elektrometer hoher Empfindlichkeit benutzt, welches eine genaue Justierung gestattete. Die verwendete Schaltung für Strom- und Leistungsmessung ist in der obengenannten Arbeit von Petersen ausführlich beschrieben, so daß ein näheres Eingehen auf dieselbe sich hier erübrigt; ebenso ist die Berücksichtigung der Fehlerkapazitäten durch die Korrektionsglieder dort eingehend behandelt. In Übereinstimmung mit genannter Arbeit sollen im folgenden die Bezeichnungen angewendet werden:

$$\left. \begin{array}{l} P = \text{Leistung.} \\ E = \text{Spannung.} \\ J = \text{Strom.} \end{array} \right\} \text{Effektivwerte}$$

$2 \alpha_e =$ Elektrometerausschlag bei Leistungsmessung.

$2 \alpha_i =$ Elektrometerausschlag bei Strommessung.

$\nu =$ Periodenzahl.

$\left(\frac{dV}{dr} \right)_m =$ mittlere Beanspruchung in Volt pro cm effektiv.

$C_1 =$ Fehlerkapazität bei der Effektmessung parallel zum ganzen Meßwiderstand.

¹⁾ Es seien hier die Untersuchungen von Wien über die Dämpfung von Ölkondensatoren bei Hochfrequenz (Ann. d. Phys. 1908: Bd. 25, S. 625), sowie die Untersuchungen von Kuhlmann (Arnold, Wechselstromtechnik Bd. II, S. 376) über die Abhängigkeit des Verlustes bei Transformatoröl von der Temperatur genannt.

²⁾ Siehe Orlich, Zeitschrift für Instrumentenkunde 1903, S. 97, H. Schultze ib. 1906 S. 147. 1907 S. 72; 1908 S. 144.

C_2 = Fehlerkapazität bei der Effektmessung parallel zum halben Meßwiderstand.
 C_h = Hilfskapazität, an der die Nadelspannung abgenommen wird.
 C_e = Kapazität des Zylinderkondensators des Spannungsteilers exkl. Schirmungs-
 ringe.

C_s = Kapazität des Zylinderkondensators des Spannungsteilers inkl. innere
 Schirmungsringe.

R = Widerstand für Leistungsmessung.

R_i = Widerstand für Strommessung.

n = Übersetzungsverhältnis des Spannungsteilers.

$\cos \varphi'$ = gemessener Leistungsfaktor.

$\cos \varphi$ = wirklicher Leistungsfaktor.

t = Temperatur.

Die Untersuchungen wurden zum Teil mit Hilfe des in der genannten Arbeit von Petersen beschriebenen Plattenkondensators (S. 103) ausgeführt; in den meisten Fällen

Fig. 1.

wurde ein Zylinderkondensator von beträchtlich größerer Kapazität verwendet. Derselbe ist auf Fig. 1 dargestellt; die Meßleitung führt zum inneren Zylinderabschnitte a, die beiden äußeren Zylinderabschnitte b und c sind miteinander und mit der äußeren Schirmung der Meßanordnung verbunden. Somit ist der Kondensator nach den gleichen Grundsätzen aufgebaut wie die von Petersen angegebenen Kondensatoren für die Spannungsteilung; das Feld im mittleren Teile ist vollständig regelmäßig und der Berechnung zugänglich. Da die Beanspruchung in radialer Richtung nicht gleichmäßig ist, sondern nach außen hin abnimmt, so wurde die äquivalente mittlere Beanspruchung $\left(\frac{dV}{dr}\right)_m$ eingeführt, die aus den Kondensatordimensionen und der Spannung berechnet wurde. Dieselbe ist in den weiter folgenden Kurventafeln jeweils angegeben. Der Kondensator war mit einer Zirkulationsvorrichtung für das Öl versehen, die aus einem Rohr und einer durch einen Elektromotor angetriebenen Pumpe bestand (auf der Figur ist dieselbe fortgelassen); durch diese Einrichtung wurde eine gleichmäßige Temperatur der zu untersuchenden Flüssigkeit gewährleistet.

Die Dimensionen des Zylinderkondensators waren folgende:

Innendurchmesser des Außenzylinders 9,80 cm

Außendurchmesser des Innenzylinders 8,00 „

Länge des Meßabschnitts 100,0 „

Die Kapazität bei Luft als Dielektrikum betrug $247 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ Farad.

Die Spannungsmessung erfolgte auf der Primärseite des Hochspannungstransformators; Kontrollversuche zeigten, daß die Genauigkeit der Messung vollständig ausreichte. Die Kurvenform der zur Speisung dienenden Maschine war sehr nahe sinusförmig.

Es sei ferner noch bemerkt, daß die Kapazität C_e des Spannungsteilers $3,11 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ Farad betrug; C_h wurde so gewählt, daß bei den höchsten Spannungen einer Versuchsreihe die Nadelspannung des Elektrometers 50–60 Volt nicht überschritt.

3. Untersuchung der Versuchsanordnung. Die Verluste in Luftkondensatoren sind nach den bisher bekannten Tatsachen außerordentlich gering. Es war anzunehmen, daß auch bei hohen Spannungen, so lange kein Glimmen auftritt, man nur mit verschwindenden Verlusten zu rechnen hat. Deshalb erschien es zweckmäßig, einen Luftkondensator zur Untersuchung der ganzen Meßanordnung und zur Kontrolle der Berechnung der Korrektionsglieder zu verwenden, indem man seine scheinbare Leistungsaufnahme bestimmte. Die Resultate dieser Untersuchung sind auf der beigegebenen

Untersuchung der Meßanordnung mit Luftkondensator.

v	E	$2 a_e$ cm	R	n	$2 a_i$ cm	R_i	J Amp.	$\cos \varphi'$ beobachtet	$\cos \varphi'$ berechnet	Ab- weichung %	
50	5 100	0,67	2×10000	161,5	12,5	$7 \cdot 10^4$	$2,458 \cdot 10^{-5}$	$5,10 \cdot 10^{-3}$	$5,24 \cdot 10^{-3}$	- 2,7	Konstante des Elektrometers $C = 4,233$
	6 120	1,0	2×10000		18,15	$7 \cdot 10^4$	2,960	5,28		+ 0,76	
	7 140	1,35	2×10000		24,8	$7 \cdot 10^4$	3,46	5,20		- 0,765	
	8 160	1,80	2×10000		32,4	$7 \cdot 10^4$	3,94	5,32		+ 1,52	
	9 170	2,35	2×10000		40,9	$7 \cdot 10^4$	4,44	5,50		+ 4,84	
	10 200	2,85	2×10000		50,55	$7 \cdot 10^4$	4,95	5,38		+ 2,63	
	11 200	3,55	2×10000		61,1	$7 \cdot 10^4$	5,43	5,55		+ 5,75	
85	3 060	0,7	2×10000	161,5	12,8	$7 \cdot 10^4$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$8,76 \cdot 10^{-3}$	$8,90 \cdot 10^{-3}$	- 1,59	
	4 080	1,20	2×10000		22,75	$7 \cdot 10^4$	3,30	8,48		- 4,89	
	5 100	1,91	2×10000		35,35	$7 \cdot 10^4$	4,13	8,65		- 2,85	
	6 120	2,70	2×10000		51,25	$7 \cdot 10^4$	4,96	8,46		- 4,96	
	7 140	3,75	2×10000		35,75	$5 \cdot 10^4$	5,83	8,57		- 3,78	
	8 160	4,80	2×10000		46,25	$5 \cdot 10^4$	6,55	8,70		- 2,27	
	9 170	6,20	2×10000		58,6	$5 \cdot 10^4$	7,43	8,66		- 2,74	
	10 200	7,70	2×10000		26,08	$3 \cdot 10^4$	8,28	8,67		- 2,64	
	11 200	9,52	2×10000		32,1	$3 \cdot 10^4$	9,18	8,76		- 1,58	

Tabelle dargestellt; der verwendete Kondensator war ein Plattenkondensator von 1 cm Plattenabstand und 15 cm Plattendurchmesser in der obengenannten Anordnung¹⁾. Die Aufnahme erfolgte bei variabler Spannung und den konstanten Periodenzahlen 50 und 85. In der Tabelle ist der gemessene scheinbare Leistungsfaktor $\cos \varphi'$ angegeben; ferner der aus den Korrektionsgliedern berechnete $\cos \varphi'$ bei Annahme eines Verlustes gleich Null.

Es war $C_1 = 276 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F. und $C_2 = 354 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F. bestimmt worden. C_s wurde aus den Dimensionen des Zylinderkondensators für die Spannungsteilung zu $5,75 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ berechnet; es ist zu beachten, daß in die Korrekturrechnung die Kapazität des Mittelstückes plus derjenigen der Zylinderabschnitte der inneren Schirmung einzuführen ist, da der durch die Widerstände fließende Ladestrom durch diese Kapazität bestimmt wird. Die maximale Abweichung des berechneten Wertes von $\cos \varphi'$ von dem beobachteten ist 5,75 %, wie aus der Tabelle zu ersehen ist. Die Fehler sind bald positiv, bald negativ, woraus zu schließen ist, daß die Verluste im Luftkondensator innerhalb der Ablesungsfehler liegen, die wegen der sehr kleinen Ausschläge immerhin einige Prozent betragen können. Nimmt man nun als ungünstigsten Fall an, daß der maximale Fehler durch eine fehlerhafte Bestimmung des Korrektionsgliedes (z. B. Fehler in der Bestimmung der Größen C_1 und C_2) entstanden ist, so hätte man bei fast allen Messungen dieser Arbeit im ungünstigsten Falle einen Fehler von $\sim 1,2$ %, auf das Meßresultat bezogen, weil das Korrektionsglied dann 20 % des gemessenen Wertes ausmacht.

Dieser Fehler ist nicht als groß anzusehen, wenn man bedenkt, daß der $\cos \varphi$ im genannten Falle nur 0,002 beträgt! Eine genauere Messung hätte auch keinen Zweck, da bei den untersuchten Flüssigkeiten sich während der Untersuchung immer zeitliche Schwankungen in den Verlusten zeigten, die bis 2 % gingen. Tatsächlich wird der Fehler noch kleiner, da, wie gesagt, wegen der sehr kleinen Ausschläge Ablesungsfehler einen beträchtlichen Einfluß hatten.

Die Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und aus der Kapazität berechneten Strom ist eine gute; für $v = 50$ und $E = 10\,200$ Volt erhielt man aus der Rechnung $5,01 \cdot 10^{-5}$; gemessen wurde $4,95 \cdot 10^{-5}$. Also eine Abweichung von ca. 1 %, die bei dem Abstand einen Fehler in der Einstellung des Kondensators von 0,1 mm entspricht; dabei ist zu bemerken, daß die Vorrichtung für die Einstellung des Plattenabstandes nicht besonders genau war.

Eine Fehlerquelle bei der Leistungsmessung kann sich aus einer schlechten Isolation zwischen den mit der Nadel verbundenen Teilen und der inneren Schirmung ergeben.

¹⁾ Petersen, a. a. O., S. 103.

Man erhält dann einen Ohmschen Widerstand parallel zur Kapazität C_h geschaltet, der eine Verschiebung zwischen der Nadelspannung E_h und der Gesamtspannung verursacht. Ist R_{is} dieser Isolationswiderstand und φ_h der Winkel zwischen E_h und der Meßspannung, so hat man für einen kleinen Wert von φ_h mit großer Annäherung

$$\cos \varphi_h = \frac{1}{\frac{2\pi\nu C_h}{R_{is}}}$$

Dieser Wert addiert sich dann zu dem tatsächlichen $\cos \varphi$, wie die Korrektionsglieder.

Um nun die Gewißheit zu haben, daß ein solcher Fehler nicht auftritt, wurde der Isolationswiderstand nach der Methode der Abnahme der Ladung mit der Zeit gemessen. Man erhielt den Wert

$$R_{is} = 0,14 \cdot 10^{14} \text{ Ohm.}$$

Für $n = 260$ war z. B. $C_h = 810 \cdot 1/9 \cdot 10^{-11}$ F. und damit

$$\cos \varphi_h = 2,5 \cdot 10^{-9}!$$

Also ein auch gegenüber den kleinsten bei der Untersuchung gefundenen $\cos \varphi$ verschwindender Wert. Da $\cos \varphi_h$ mit C_h , also mit dem Übersetzungsverhältnis n abnehmen muß, so gibt die Messung eines und desselben Effektes bei verschiedenen n eine weitere Kontrolle; es zeigte sich hier, daß, innerhalb der möglichen Beobachtungsfehler, man immer den gleichen Effekt erhielt. Dieses günstige Ergebnis wurde dadurch erreicht, daß bei der Zusammensetzung der Schaltung auf besonders gute Isolation der fraglichen Teile geachtet wurde.

Die gute Isolation der Nadel des Elektrometers hatte übrigens die Erscheinung zur Folge, daß beim Umschalten von der Strom- zur Effektmessung unter Spannung eine Ladung auf den mit der Nadel verbundenen Teilen zurückblieb, die infolge der Kontaktpotentiale der Quadranten zu Ausschlägen führte, welche bei der Messung störten. Es wurde deshalb fast immer Strom und Leistung in aufeinanderfolgenden Reihen aufgenommen, was infolge der Konstanz des Stromes gut möglich war.

4. Untersuchung von Transformatorenöl. Zur Untersuchung gelangte ein helles Transformatorenöl, das von den Siemens-Schuckert-Werken geliefert war. Es wurde im Zylinderkondensator untersucht; bei den Vorversuchen hatte es sich gezeigt, daß infolge der sehr kleinen Verluste die Messung mit dem Plattenkondensator ungenau wurde, weil man große Widerstände nehmen mußte und dementsprechend große Korrektionsglieder erhielt.

Es wurden zwei Proben von dem Öl untersucht, die zu verschiedenen Zeitpunkten entnommen waren; vor der Untersuchung war das Öl nach dem Verfahren von Tobey mittels Durchpressens durch Filtrierpapier entfeuchtet worden.

Die Resultate der Untersuchung der Probe I bei konstanter Spannung, konstanter Temperatur und variabler Periodenzahl sind in den Kurven der Fig. 2 zusammengestellt.

Es wurde gemessen $C_1 = 263 \text{ cm}$, $C_2 = 314 \text{ cm}$. Die Korrektur betrug im ungünstigsten Falle ($E = 31200$, $\nu = 60$) $\sim 15\%$ des gemessenen Wertes; der Fehler durch etwaige Ungenauigkeit der Korrektur ist $< 1\%$. Die Verluste sind sehr klein und praktisch unabhängig von der Periodenzahl.

Die Kurven I, II, III stellen die Verluste pro cm^3 bei den angegebenen Beanspruchungen in Abhängigkeit von der Periodenzahl dar: sie sind gerade Linien fast parallel zur Abzissenachse.

Die Werte schwanken etwas um einen konstanten Mittelwert. Diese prozentual nicht großen Schwankungen, die als Unregelmäßigkeiten in der Lage der Punkte zum Ausdruck kommen, sind nicht etwa durch Ablesungsfehler entstanden, sondern es sind wirkliche Änderungen der Verluste die während der Beobachtung dauernd eintraten; es war dabei ziemlich gleichgültig, ob die Zirkulationspumpe in Tätigkeit war oder nicht. Bei höheren Spannungen scheinen die Schwankungen größer zu sein. Der Grund dieser

Erscheinung liegt vielleicht in Staubteilchen usw., die sich im Öl bewegten und in die Meßzone kamen.

Die Kurven zeigen deutlich, daß bei der untersuchten Probe I der von der Periodenzahl abhängige Verlust verschwindend war; somit war der Verlust als ein Leitungsverlust und nicht als ein Verlust durch dielektrische Hysterese anzusehen. Die Kurven IV und V geben den $\cos \varphi$ für zwei verschiedene Spannungen, wobei allerdings auch Temperaturunterschiede vorhanden waren; entsprechend dem konstanten Verlust verlaufen diese Kurven nahezu wie Hyperbeln. Die Kurve VI gibt den Strom für $E = 21000$, $\left(\frac{dV}{dr}\right)_m = 23180 \text{ V/cm}$; er wächst mit großer Genauigkeit proportional der Periodenzahl und stellt praktisch den wattlosen Strom dar. Die Dielektrizitätskonstante ist, wie zu erwarten war, von der Periodenzahl unabhängig.

Fig. 2.

Fig. 3.

Um den Zahlenwert der Dielektrizitätskonstante ϵ zu bestimmen, wurde nicht die berechnete Luftkapazität des Kondensators benutzt, sondern vor dem Eingießen des Öls die Stromaufnahme mit Luft als Dielektrikum bestimmt. Man erhielt daraus $C_v = 254,6 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ F.}$, also gegenüber dem früher berechneten Wert $C_v = 247 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ eine Abweichung von 2,7 %, die bei der geringen Differenz der Durchmesser beider Zylinder aus den Ungenauigkeiten bei der Konstruktion und der Zentrierung zu erklären ist. Die aus der Strommessung bei Öl im Mittel bestimmte Kapazität war 590 cm; daraus erhielt man

$$\epsilon = 2,32 \text{ bei } 17,7^\circ \text{ C.}$$

Die Fig. 3 gibt die Resultate der Untersuchung der zweiten Ölprobe, ebenfalls bei konstanter Spannung und veränderlicher Periodenzahl. Diese Probe II schien etwas verunreinigt zu sein. Ihre Durchschlagsfestigkeit war geringer als bei der ersten, indem

ein Durchschlag schon bei $E = 23\,000$ Volt beobachtet wurde, während bei der Probe I er erst bei $27\,000$ Volt erfolgte; die Verluste waren auch wesentlich höher, was man besonders aus den Werten für $\cos \varphi$ erkennt.

Auffallend ist aber die Tatsache, daß, wie die Kurven I, II und III der Figur erkennen lassen, ein deutliches, wenn auch geringes Ansteigen der Verluste mit der Periodenzahl vorhanden ist. Allerdings ist der weitaus größte Teil des Verlustes wiederum unabhängig von der Periodenzahl. Es ist als wahrscheinlich anzunehmen, daß das beobachtete Ansteigen des Verlustes bei der zweiten Probe auf Staubteilchen oder Zersetzungsprodukte infolge von Durchschlägen zurückzuführen ist, die einen geringen Hystereseverlust verursachen.

Die Kurve IV stellt den $\cos \varphi$ für $16\,180$ V/cm, die Kurve V den Strom dar. Etwas Neues geben diese Kurven nicht.

Die Untersuchung der zweiten Ölprobe bestätigt im wesentlichen die bei der ersten erhaltenen Resultate, zeigt aber, daß die Verluste an sich große zeitliche Schwankungen aufweisen und auch durch zufällige Umstände beeinflusst werden, wenn auch der Grundcharakter im wesentlichen derselbe bleibt.

Es ist nicht von der Hand zu weisen, daß die Größe des Verlustes wahrscheinlich durch den Feuchtigkeitsgehalt des Öles beeinflusst wird. Auf eine genaue Untersuchung dieses Einflusses mußte hier verzichtet werden, da sich der Feuchtigkeitsgehalt beim Öl nur schwer bestimmen läßt; es zeigte sich bei Öl, das längere Zeit (8—10 Tage) offen gestanden und sicher Feuchtigkeit aufgenommen hatte, wohl eine Zunahme des Verlustes, die aber nicht so groß war, wie man aus der Verschlechterung der Festigkeit anzunehmen geneigt war.

Da die bei verschiedenen Spannungen aufgenommenen Kurven der vorhergehenden Reihen zu verschiedenen Zeit und teilweise bei verschiedenen Temperaturen beobachtet worden sind, so sind sie nicht direkt vergleichbar. Es mußte deshalb die Abhängigkeit der Verluste von der Spannung bei konstanter Periodenzahl getrennt aufgenommen werden. Die Fig. 4 gibt die Resultate dieser Untersuchungen für die zweite Probe. Die Versuche an der Probe I sind nicht angegeben, da sie qualitativ das gleiche Ergebnis lieferten.

Die Kurven I und II der genannten Figur stellen den Verlust bei 60 bzw. 25 Perioden als Funktion der mittleren Beanspruchung dar; sie sind bei verschiedenen Temperaturen und zu verschiedener Zeit aufgenommen. Die Kurven III und IV geben die entsprechenden

Fig. 4.

Leistungsfaktoren an; aus ihrem Verlauf ist zu ersehen, daß der Verlust schneller wächst als quadratisch ($\cos \varphi = \text{const}$), aber langsamer als mit der dritten Potenz ($\cos \varphi$ proportional der Spannung). Würde man somit den Verlust als durch einen Leistungswiderstand entstanden denken, so würde dieser mit der Spannung abnehmen.

Interessant ist der Vergleich zwischen den Kurven I und II, die für zwei verschiedene Periodenzahlen aufgenommen worden sind. Man muß allerdings mit etwaigen Schlüssen vorsichtig sein, da die Temperatur ebenfalls verschieden ist. Jedenfalls ist die Kurve II nicht durch eine proportionale Vergrößerung der Kurve I entstanden, wie man sich leicht überzeugen kann, so daß z. B., wenn man beide Kurven angenähert durch eine Funktion

$$P = C \cdot \left(\frac{dV}{dr} \right)_m^\alpha$$

darstellen will, der Exponent verschiedene Werte bekommt. Man sieht daraus, daß der Verlauf der Kurven nicht streng derselbe bleibt, und daß eine Bestimmung des Exponenten keinen besonderen Wert hat; doch wurde, um ungefähr einen Anhaltspunkt zu bekommen, der mittlere Exponent für beide Kurven bestimmt, wobei es sich zeigte, daß die Kurve überhaupt nicht streng durch eine Exponentialfunktion darzustellen war. Im Mittel erhielt man für I $\alpha = 2,13$, für II $\alpha = 2,27$.

Es ist zu bemerken, daß der höchste Punkt der Kurve I bei $\left(\frac{dV}{dr} \right)_m = 32\,410$ Volt/cm kurz vor dem Eintritt des Durchschlags aufgenommen wurde, der bei $\sim 35\,000$ V/cm erfolgte. Trotzdem fällt dieser Punkt gut in die Kurve, ohne daß irgendwelche Unstetigkeit zu bemerken war; der Durchschlagspunkt ist in bezug auf die Verluste kein irgendwie charakteristischer Punkt, ein Resultat, das mit dem von Hochstätter¹⁾ für Kobelisolation gefundenen übereinstimmt.

Die Stromlinie V ist eine Gerade und zeigt, daß die Dielektrizitätskonstante unabhängig von der Spannung ist.

Ferner wurde die Abhängigkeit des Verlustes von der Temperatur bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen untersucht. Die Erwärmung erfolgte auf elektrischem Wege durch eine Heizspirale, die mit einer Asbestunterlage auf die Mantelfläche des Zylinderkondensators aufgebracht war. Die Messung der Temperatur wurde durch Thermometer ausgeführt. Die Beobachtungen erfolgten bei sich abkühlender Flüssigkeit, wodurch eine sehr gleichmäßige Temperatur gewährleistet war; die Zirkulationspumpe trug dazu wesentlich bei. Von den Thermometern befand sich eines ungefähr in der Mitte des Meßstückes, das andere etwas unter der Oberfläche der Flüssigkeit; die Ablesungen wurden erst dann

ausgeführt, wenn beide Thermometer ungefähr die gleiche Temperatur zeigten. In die Kurventafeln ist immer die in der Mitte des Meßabschnittes bestimmte Temperatur eingeführt. Da während der Hochspannungsmessung die Thermometer entfernt werden mußten, so verging immer einige Zeit zwischen der Thermometerablesung und der Messung.

Fig. 5.

¹⁾ Hochstätter, ETZ. 1910, S. 467.

Infolge der hohen Wärmekapazität des Zylinderkondensators war nur bei den hohen Temperaturen ein merklicher Fehler durch Abkühlung zu erwarten, was durch Kontrollversuche bestätigt wurde. Um diesen Fehler klein zu halten, mußten die Strommessung und Leistungsmessung in zwei getrennten Reihen erfolgen.

Fig. 5 gibt die Resultate der Temperaturversuche für die Ölprobe II. Vor der Erwärmung wurde ein Kontrollpunkt aufgenommen; dieses wurde auch bei allen nachfolgenden Erwärmungsmessungen ausgeführt. Zur Berechnung der Leistungsfaktoren für die Korrekturrechnung wurde der Strom aus der entsprechenden Kurve entnommen (II). Die Kurve I gibt die Verluste pro cm^3 ; sie zeigt, daß das Anwachsen des Verlustes mit der Temperatur ein ganz außerordentliches ist; damit wird der Verlust sehr deutlich als ein Leitungsverlust mit elektrolytischem Charakter charakterisiert. Da die Abhängigkeit der Isolationswiderstände bei Guttapercha, Kabelisolation von der Temperatur nach bekannten Untersuchungen annähernd durch eine Exponentialfunktion dargestellt werden kann, so lag es nahe, die Kurve I in diesem Sinne zu untersuchen. Könnte man die Kurve durch eine Funktion von der Form

$$C \cdot a^{(b + t)^0}]$$

darstellen, so müßten die Logarithmen der Verlustwerte, in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen, eine Gerade ergeben. Die Kurve IV enthält diese Logarithmen, wobei die Verluste vor der Logarithmierung mit 10^4 multipliziert worden sind, um negative Werte zu vermeiden. Man sieht, daß die Kurve, besonders im unteren Teile, stark gekrümmt ist und nur mit grober Annäherung im oberen Teile durch eine Gerade ersetzt werden kann.

Das Verhalten des Stromes ist aus der Kurve II zu ersehen; sie hat ein schwach ausgeprägtes Minimum bei $\sim 50^\circ$. Aufklärung über dieses eigentümliche Verhalten gibt die Kurve des wattlosen Stromes (III). Dieselbe zeigt eine merkliche Abnahme der Dielektrizitätskonstante mit der Temperatur. Durch die gleichzeitige bedeutende Zunahme des Wattstromes erhält die Kurve des resultierenden ein Minimum. Die Dielektrizitätskonstante folgt mit Annäherung der Gleichung:

$$C_t = 2,32 (1 - 0,00615 (t - 15)).$$

Ferner wurde untersucht, ob die Zunahme des Verlustes von der Periodenzahl unabhängig ist, d. h. ob vielleicht ein bei normalen Temperaturen nicht oder wenig merkbarer, von der Periodenzahl abhängiger dielektrischer Verlust eine Steigerung durch die Erwärmung erfährt. Diese Untersuchungen sind nur für Erwärmungen bis $\sim 45^\circ$ durchgeführt, um die Abkühlungsfehler möglichst klein zu halten. Die Resultate sind auf

Fig. 6.

Fig. 6 dargestellt. Die Kurve I gibt die Verluste für $v = 50$ bei $13\,500\text{ V/cm}$ an. Bei der gleichen Spannung sind die Verluste auch für $v = 30$ aufgenommen und in dieselbe Kurve ein-

getragen. Man sieht, daß die Punkte innerhalb der zulässigen Fehler in die Kurve fallen; damit ist die Unabhängigkeit des mit der Temperatur wachsenden Verlustes von der Periodenzahl nachgewiesen; die Folgerung über den Charakter des Verlustes als elektrolytischer Leistungsverlust wird dadurch bestätigt. Eine weitere Meßreihe wurde für eine höhere Spannung (19 650 V/cm) und 50 Perioden aufgenommen. Die Kurve II stellt die Resultate dieser Meßreihe dar, und zwar in halbem Maßstab im Vergleich mit Kurve I.

Der Verlauf beider Kurven ist gleichartig. Bildet man das Verhältnis der Werte II : I, so erhält man eine konstante Größe (Linie V). Dieses zeigt, daß die Spannung auf den Charakter der Abhängigkeit von der Temperatur keinen Einfluß hat. Die Logarithmen sind in den Kurven III und IV angegeben, um auch bei dieser Untersuchung zu zeigen, daß sogar für geringe Temperaturen der Verlauf durch eine Exponentialkurve nicht darzustellen ist. Die mit der Probe I durchgeführten Versuche gaben die gleichen Resultate.¹⁾

5. Untersuchungen von Rizinusöl. Das untersuchte Rizinusöl war von E. Merck, Darmstadt, bezogen und wurde direkt in das Versuchsgefäß eingefüllt; die Versuche sind mit dem Zylinderkondensator durchgeführt worden. Es war $C_1 = 421 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-11}$ F.; $C_2 = 335,3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-11}$ F.

Fig. 7.

Fig. 8.

Die Resultate der Untersuchung bei konstanter Spannung und Temperatur und variabler Periodenzahl sind in Fig. 7 enthalten. Was die Größe der Verluste betrifft, so waren sie von der gleichen Größenordnung wie bei Transformatoröl und lagen den bei Probe II beobachteten Werten sehr nahe.

¹⁾ Kuhlmann hat durch direkte Messungen mit dem Wattmeter bei Transformatoröl gleichfalls ein starkes Anwachsen des Verlustes mit der Temperatur gefunden; doch ergeben seine Beobachtungen ein gleichzeitiges starkes Anwachsen des wattlosen Stromes mit der Temperatur, was mit den hier wiedergegebenen Resultaten in Widerspruch steht.

Die Kurven I, II, III, die den Verlust pro cm^3 angeben, zeigen, daß derselbe aus einem großen von der Periodenzahl unabhängigen und einem sehr kleinen abhängigen Glied besteht, wobei das letztere erst bei höheren Spannungen deutlich zum Ausdruck kommt. Da das Öl in vollständig gereinigtem Zustande nach sorgfältiger Reinigung des Versuchs-kondensators eingefüllt und gleich darauf die Aufnahmen gemacht wurden, so kann behauptet werden, daß der veränderliche Verlust tatsächlich beim reinen Öle vorhanden ist. Der genaue Charakter dieses veränderlichen Verlustes läßt sich wegen seiner geringen Größe nur schwer bestimmen; mit einiger Sicherheit läßt sich behaupten, daß er geradlinig ansteigt, und die kleine Abweichung bei den höheren Periodenzahlen in der Kurve I nur eine zufällige ist.

Der praktisch bei den untersuchten Frequenzen in Frage kommende Verlust hat wie beim Transformatorenöl den Charakter eines Leitungsverlustes. Die angegebenen $\cos \varphi$ -Kurven sind einer Hyperbel nahe.

Der Strom steigt (Kurve V) geradlinig mit der Periodenzahl an. Die Dielektrizitätskonstante ergibt sich zu 4,91 bei $16,6^\circ \text{C}$.

Fig. 8 enthält die Resultate der Untersuchung für konstante Periodenzahl und variable Spannung. Die Kurve I ist bei 60 Perioden und $t = 18,5^\circ$, die Kurve II bei 25 Perioden und 14° aufgenommen. Die Verschiedenheit beider Kurven ist auf die Temperatur zurückzuführen; das Verhältnis der Werte beider Kurven (Linie VI) ist konstant.

Aus dem letzten Umstande ist zu ersehen, daß der Charakter des Verlaufs der Kurve derselbe bleibt, also z. B. auch der Exponent. Derselbe ist im Mittel zu 2,18 bestimmt worden; die unter III und IV aufgetragenen $\cos \varphi$ -Kurven zeigen, daß der Verlust, wie beim Transformatorenöl, schneller als quadratisch anwächst.

Die Dielektrizitätskonstante ist hier ebenfalls von der Spannung unabhängig, wie der geradlinige Verlauf der Stromlinie (V) zeigt.

Die Untersuchungen bei veränderlicher Temperatur sind in der Fig. 9 zusammengestellt. Die Beobachtungsmethode war die gleiche, wie sie bei den Versuchen mit Transformatorenöl eingehend beschrieben ist. Die Kurve I zeigt ein sehr großes Ansteigen des Verlustes mit der Temperatur; der Anstieg ist noch größer als bei Transformatorenöl: bei $\nu = 60$ erreicht der $\cos \varphi$ bei 77° den Wert von 0,23, während er bei $15,8^\circ$ nur 0,0034 beträgt, also eine 68fache Vergrößerung. Die Vergrößerung erfolgt nur auf Kosten des von der Periodenzahl unabhängigen Verlustes; die für 25 Perioden aufgenommenen Punkte sind besonders gekennzeichnet und fallen mit großer Genauigkeit in die Kurve für $\nu = 60$. Durch eine Exponentialfunktion kann die Kurve ebensowenig genau dargestellt werden wie bei Transformatorenöl, was die Logarithmenkurve (VI) deutlich zeigt.

Interessant ist das Verhalten des Stromes bei veränderlicher Temperatur. Der Charakter ist ähnlich wie bei Transformatorenöl, nur viel ausgeprägter als bei diesem.

Die bei 25 Perioden aufgenommene Kurve IV zeigt ein deutliches Minimum bei 55° ; die Kurve II für $\nu = 50$ hat innerhalb des untersuchten Temperaturbereichs kein Minimum, doch läßt der Verlauf der Kurve vermuten, daß ein solches bei einer höheren Temperatur auftritt. Die Ermittlung des wattlosen Stromes, der in den Kurven III und V aufgetragen ist, zeigt eine wesentliche Abnahme der Dielektrizitätskonstante mit der Temperatur. Durch die gleichzeitige Zunahme des Wattstromes erhält man für eine bestimmte Periodenzahl eine Temperatur, bei welcher der resultierende Strom ein Minimum hat. Die Dielektrizitätskonstante läßt sich annähernd durch die Gleichung darstellen

$$C_t = 4,90 (1 - 0,0023 (t - 15)).$$

Die Untersuchungen zeigen, daß bei Rizinusöl, also einem vegetabilischen Öl, der Verlust praktisch fast ganz durch elektrolytische Leitung entsteht, wie bei einem Mineralöl (Transformatoröl).

Es wurde ferner der Isolationswiderstand des Öles durch eine Gleichstrommessung bei verschiedenen Temperaturen bestimmt unter Verwendung eines Spiegelgalvanometers.

Die Spannung betrug konstant 10 V bei allen Temperaturen. Die Resultate sind in der Fig. 10 dargestellt. Die Kurve I gibt den mit Gleichstrom gemessenen Widerstand an. Zum Vergleiche wurde der äquivalente Widerstand bei Wechselstrom aus der Verlustkurve 1 der Fig. 9 bestimmt. Die Resultate sind als Kurve II aufgetragen.

Fig. 9.

Fig. 10.

Man sieht, daß der Verlauf beider Kurven ein ganz ähnlicher ist; auch die Größenordnung stimmt überein, nur ist der Wechselstromwiderstand kleiner, also die gemessenen Verluste größer, als man sie bei Zugrundelegung des Gleichstromwiderstandes erhalten würde. Wegen der Polarisationserscheinungen war dieses Resultat auch zu erwarten. Der Versuch bestätigt ebenfalls die ausgesprochene Annahme über den Charakter der Verluste.

6. Untersuchungen von Paraffinöl. Das untersuchte Paraffinöl war von E. Merck, Darmstadt, bezogen. Bei der Untersuchung zeigte sich, daß die Verluste außerordentlich klein waren und dadurch die Unsicherheit in der Korrekturbestimmung usw. beträchtliche Fehler verursachen konnte. Es haben deshalb die Versuche nur allgemein orientierenden Wert. Die Größenordnung des $\cos \varphi$ war im Mittel $\sim 0,0003$!

Die Untersuchung erfolgte im Zylinderkondensator, und es war $C_1 = 256 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F., $C_2 = 314 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F. bestimmt. Fig. 11 gibt die Resultate bei variabler Periodenzahl, konstanter Spannung und Temperatur. Kurve I zeigt die Verluste in Abhängigkeit von der Periodenzahl. Es ist zu erkennen, daß ein Teil der Verluste unabhängig von der Periodenzahl ist, dagegen tritt auch ein veränderlicher Verlust in derselben Größenordnung ein. Scheinbar wächst dieser im Bereiche der höheren Periodenzahlen schneller als linear

an; doch ist dieses Resultat mit Vorsicht aufzufassen, da durch die genannten Unsicherheiten das Resultat gefälscht sein kann. Man muß sich somit mit der Feststellung begnügen, daß hier ein von der Periodenzahl abhängiger und ein konstanter Verlust in gleicher Größenordnung vorhanden ist, über den Charakter des ersteren kann bis jetzt noch nichts Bestimmtes ausgesagt werden. Der Strom (II) verlief nach einer Geraden, die Dielektrizitätskonstante war 2,24 bei 15° . Fig. 12 zeigt die Abhängigkeit des Verlustes von der

Fig. 11.

Fig. 12.

Fig. 13.

Spannung bei sonst konstanten Verhältnissen ($v = 60$). I ist der Verlust, II der $\cos \varphi$, III der Strom. Das Anwachsen des Verlustes mit der Spannung erfolgt fast quadratisch. Die Dielektrizitätskonstante ist von der Spannung unabhängig.

Eine weitere Untersuchung wurde bei veränderlicher Temperatur ausgeführt (Fig. 13). Dieser Versuch hat deshalb besonderes Interesse, weil die Korrektur von der Temperatur

fast unabhängig ist, also den Verlauf der Kurven nicht beeinflussen kann. Die Leistungsmessungen sind bei der gleichen mittleren Feldstärke 16 750 V/cm und einmal bei $\nu = 60$ (I), das zweitemal bei $\nu = 35,2$ (II) ausgeführt. Beide Kurven zeigen eine wesentliche Erhöhung des Verlustes mit der Temperatur; wäre nur der von der Periodenzahl unabhängige Verlust gewachsen, so wären beide Kurven äquidistant. Dieses ist aber nicht der Fall, so daß angenommen werden muß, daß auch der abhängige Verlust ansteigt.

Die Stromkurve II kann wegen des sehr kleinen $\cos \varphi$ als die Kurve des rein wattlosen Stromes in ihrem ganzen Verlauf angesehen werden. Sie zeigt eine schwache Abnahme der Dielektrizitätskonstante mit der Temperatur, also qualitativ dasselbe Verhalten wie bei den anderen untersuchten Ölen.

7. Untersuchung eines Körpers beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand.

Bei allen hier untersuchten Flüssigkeiten waren die von der Periodenzahl abhängigen Verluste außerordentlich klein, teilweise nicht mehr sicher nachweisbar. Andererseits sind bei festen isolierenden Körpern oft Verluste dieser Art von recht beträchtlicher Höhe gefunden worden. Es lag nun nahe, zu untersuchen, ob das Vorhandensein von größeren dielektrischen Hystereseverlusten durch den festen Zustand eines Isolators bedingt wird; dieses ließ sich am besten an einem Isolator untersuchen, der leicht schmelzbar war und sich dabei nicht zersetzte.

Die Untersuchung wurde an einem Gemisch von 2 Gewichtsteilen Kolophonium und 1 Teile Bienenwachs ausgeführt¹⁾. Dieses Gemisch schmilzt bei etwa 50° und erstarrt sehr gleichmäßig ohne Rißbildung. (Ein ähnliches Gemisch wird für die Isolation von Funkeninduktoren usw. oft verwendet.)

Zur Untersuchung wurde der Plattenkondensator verwendet, der in ein Blechgefäß gestellt war; das letztere konnte durch eine Heizplatte erwärmt werden. Zuerst wurde das Gemisch in erstarrtem Zustande in bezug auf die Abhängigkeit der Verluste von der Periodenzahl untersucht. Es wurde flüssig in das Gefäß gefüllt und erst unter Spannung gesetzt, nachdem es erstarrt war und die Zimmertemperatur angenommen hatte. Die Resultate sind in der Fig. 14 enthalten; der Plattenabstand war 1 cm; $C_1 = 403 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F. $C_2 = 303 \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F. Die Verluste waren ziemlich klein, der $\cos \varphi$ hatte aber immerhin noch die Größenordnung 0,0036, war also wesentlich höher als derjenige, der bei den Flüssigkeiten dem veränderlichen Teile der Verluste entspricht. Die Messung mit dem kleinen Kondensator war wegen des relativ kleinen $\cos \varphi$ mit kleinen Ablesungsfehlern behaftet; auch die Korrektion hatte beträchtlichen Einfluß auf das Resultat. Dieses kommt in einigen Unregelmäßigkeiten in der Lage der Punkte zum Ausdruck. Die Kurve I stellt den Verlust als Funktion der Periodenzahl dar; er wächst geradlinig an und hat eine sehr kleine von der Periodenzahl unabhängige Komponente. Es zeigt sich somit, daß der Verlust zu seinem weitaus größten Teile durch dielektrische Hysteresehervorgebracht wird. Die Stromlinie II ist eine Gerade; die Dielektrizitätskonstante wurde zu 2,80 bestimmt bei $t = 13^\circ$.

Darauf wurde das Gemisch bei veränderlicher Temperatur untersucht; man erwärmte es bis zur Verflüssigung und dann darüber hinaus bis etwa 100°. Die Messungen erfolgten während der Abkühlung, um möglichst gleichmäßige Temperatur zu erhalten. Die Temperatur wurde mit 2 Thermometern bestimmt, deren Kugeln zwischen untere Platte und Schirmring eingeführt wurden. Solange die Masse flüssig war, war die Temperaturmessung ziemlich genau. Nach dem Erstarren wurde sie wegen der ungleichmäßigen Abkühlung etwas unsicher. Diese Unsicherheit kommt auch in den Kurven zum Ausdruck; da aber für die vorliegende Arbeit nur die qualitativen Verhältnisse in erster Linie von Interesse waren, wurde vorläufig von einer genaueren Temperaturbestimmung, etwa durch Thermoelemente, abgesehen.

¹⁾ Petersen hat in seiner Arbeit „Hochspannungs-Leistungsmessungen mit dem Elektrometer“, Arch. f. El., I. Bd., S. 102 u. ff., auf die Resultate dieser Untersuchungen des Verfassers hingewiesen.

Die Resultate sind in der Fig. 15 angegeben. Die Kurve II stellt die Verluste bei 10 200 V/cm und $\nu = 60$, III bei der gleichen Spannung und $\nu = 25$ dar. Die Punkte der letzten Kurve sind besonders bezeichnet. Der Verlauf ist sehr charakteristisch: von 77° bis $\sim 57^\circ$ fällt der Verlust außerordentlich schnell ab, dabei fallen beide Kurven in diesem Bereiche vollständig zusammen, der Verlust ist somit unabhängig von der Periodenzahl. Das Gemisch ist in diesem Bereich dünnflüssig, fängt bei 57° an zähflüssig zu werden, gleichzeitig sieht man beide Kurven auseinandergehen, d. h. es tritt ein von der Periodenzahl abhängiger Verlust auf, der sich immer deutlicher ausprägt, da die Kurven

Fig. 14.

Fig. 15.

immer mehr voneinander abweichen. Gleichzeitig erreicht der Verlust bei ca. 43° ein Minimum, worauf er schnell zu steigen anfängt. Um 43° wird die Masse zähe, bei 30° ist sie schon spröde. Bei dieser Temperatur erreicht der Verlust ein Maximum, ungefähr gleichzeitig bei beiden Kurven (die geringe Verschiebung ist vielleicht auf ungenaue Temperaturmessung zurückzuführen). Dann sinkt der Verlust rasch, um bei Zimmertemperatur die früher beobachteten Werte anzunehmen. Diese Untersuchung wurde auch bei anderen Spannungen und Periodenzahlen stets mit dem gleichen Ergebnis wiederholt. Sie zeigt sehr deutlich, wie der dielektrische Verlust vom molekularen Zustand des Isolators abhängt. Beim Übergang in den flüssigen Zustand wird der bei 30° z. B. sehr beträchtliche Hystereseverlust ganz unmerklich, und es tritt ein elektroytischer Leitungsverlust an seine Stelle.

Die Kurve I stellt die Abhängigkeit des Stromes von der Temperatur dar ($\nu = 60$; 10 200 V/cm). Bei den in Betracht kommenden Phasenverschiebungen fällt der wattlose Strom praktisch mit dieser Kurve zusammen. Man sieht, daß die Dielektrizitätskonstante ein ausgesprochenes Maximum hat, das bei $\sim 42^\circ$ liegt. Im flüssigen Zustande tritt eine Abnahme derselben mit t ein, wie bei den früher untersuchten Flüssigkeiten; von 70° ab ändert sie sich nicht mehr merklich.

8. Zusammenstellung der Versuchsergebnisse. Für Beanspruchungen bis ca. 34 000 V/cm, innerhalb der Periodenzahlen der Niederfrequenztechnik (20 bis 65) und der Temperaturen 13 bis 90° waren die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit folgende:

1. Transformatorenöl:

- a) Die Verluste waren von der Periodenzahl praktisch unabhängig (die bei einer Probe beobachtete sehr geringe abhängige Verlustkomponente war auf Verunreinigung zurückzuführen) und relativ sehr klein — ($\cos \varphi_{\max} = 0,0056$ bei $\nu = 50$);
- b) die Verluste wuchsen außerordentlich schnell mit der Temperatur an, wobei sie unabhängig von der Periodenzahl blieben;
- c) aus a) und b) folgt, daß die Verluste den Charakter von Verlusten durch elektrolytische Leitung hatten;
- d) das Anwachsen des Verlustes mit der Spannung war etwas schneller als quadratisch;
- e) das Eintreten des Durchschlages war durch keine Unstetigkeiten in den Strom- und Verlustkurven charakterisiert;
- f) die Dielektrizitätskonstante nahm mit der Temperatur ab und war von der Spannung unabhängig.

2. Rizinusöl:

- a) Die Verluste setzten sich aus einer sehr kleinen von der Periodenzahl abhängigen, und einer großen unabhängigen Komponente zusammen;
- b), c), d), e) f) wie bei 1.

Die Verluste waren hier ebenfalls zu ihrem überwiegenden Teil als elektrolytische Leitungsverluste zu betrachten. Die Abnahme der Dielektrizitätskonstante mit der Temperatur war wesentlich stärker als bei Transformatorenöl.

3. Paraffinöl:

- a) Die Verluste waren fast so klein wie bei 1. und 2.; die Messung war mit Unsicherheiten behaftet. Der Leistungsfaktor hatte die Größenordnung von 0,0003;
- b) die Verluste bestanden aus einem von der Periodenzahl abhängigen und einem unabhängigen Teil, beide von gleicher Größenordnung. Über den Charakter der Abhängigkeit ließ sich nichts Bestimmtes aussagen;
- c) die Verluste wuchsen mit der Temperatur, an dem Anwachsen scheint auch der von der Periodenzahl abhängige Verlust beteiligt zu sein;
- d) die Verluste wuchsen fast quadratisch mit der Spannung;
- f) die Dielektrizitätskonstante nahm mit der Temperatur ab und war unabhängig von der Spannung.

4. Das dielektrische Verhalten eines Isolators beim Übergang vom festen in den flüssigen Zustand wurde an einem Gemisch von Kolophonium und Bienenwachs untersucht:

- a) in festem Zustande war der Verlust zum überwiegenden Teile ein Verlust durch dielektrische Hysterese, also proportional der Periodenzahl;
- b) bei Verflüssigung des Gemisches wurde der Verlust fast unabhängig von der Periodenzahl und stieg mit der Temperatur sehr stark an, bekam also den Charakter eines Verlustes durch elektrolytische Leitung;
- c) der dielektrische Hystereseverlust hatte ein scharfes Maximum bei $\sim 30^\circ$;
- d) die Dielektrizitätskonstante hatte ein Maximum bei 42° .

Die Resultate lassen sich in folgenden Satz zusammenfassen, der vielleicht einen weiteren Geltungsbereich hat:

Bei den untersuchten flüssigen Isolatoren ist der von der Periodenzahl abhängige Verlust außerordentlich klein, der Leistungsfaktor, der diesem Verlust entspricht, hat die Größenordnung einiger Zehntausendstel. Tritt ein größerer Verlust auf, so hat er den Charakter eines Verlustes durch elektrolytische Leitung und ist von der Periodenzahl unabhängig. Die Art des Verlustes steht mit dem molekularen Zustand in engem Zusammenhang. Beim Erstarren eines flüssigen Gemisches tritt ein meß-

¹⁾ Alfred Hay, The behaviour of a transformer at the instant of switching in. The electrical review 1898, S. 326.