

## Die elektrischen Dipole in flüssigen Dielektriciis.

Von J. Herweg und W. Pötzsch in Halle a. d. S.

Mit zwei Abbildungen. (Eingegangen am 23. Oktober 1921.)

Im vorigen Jahrgang dieser Zeitschrift hat der eine von uns<sup>1)</sup> in einer Arbeit, die unter gleichem Titel erschien, auf Grund der Debyeschen Dipoltheorie berechnet, wie sich die Dielektrizitätskonstante einer Flüssigkeit, welche Dipole enthält, unter der Wirkung eines elektrischen Feldes verkleinern muß. Die abgeleitete Beziehung lautete:

$$\Delta\varepsilon = \frac{4\pi Nm^2}{15 k^3 T^3} \frac{\mathcal{E}^2}{(1 - \Theta)^4}. \quad (1)$$

Hierin bedeutete:

$\Delta\varepsilon$  die Abnahme der Dielektrizitätskonstante, d. h. die Differenz der Werte der Dielektrizitätskonstante bei dem Felde 0 bzw. zu vernachlässigendem  $\mathcal{E}$  und sehr großem  $\mathcal{E}$ .

$N$  die Zahl der Dipole = der Zahl der Moleküle pro ccm, da ja Debye annimmt, daß jedes Molekül mit einem Dipol behaftet ist.

$m$  die Größe des Moments eines Dipols.

$k$  die Boltzmann-Plancksche Konstante.

$T$  die absolute Temperatur.

$\mathcal{E}$  die Feldstärke.

$\Theta = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}$ , worin  $\varepsilon$  die Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit bei der Temperatur  $T$ .

Die Gleichung für  $\Delta\varepsilon$  war in der früheren Arbeit einer ersten experimentellen Prüfung unterzogen, und es war gefunden, daß einmal die Beziehung

$$\Delta\varepsilon \sim \mathcal{E}^2$$

durch den Versuch an Äthyläther sehr gut bestätigt wird.

Sodann war aber unter Zugrundelegung des von Debye aus der Temperaturabhängigkeit des Äthyläthers berechneten Wertes von  $m$   $\Delta\varepsilon$  ausgerechnet und in Vergleich gesetzt zu dem Werte, der sich aus dem Versuche ergab. Die in der angeführten Arbeit auf S. 46 angegebenen Werte lauteten:

$$\begin{aligned} &9 \cdot 10^{-6} \text{ (theoretisch),} \\ &6,5 \cdot 10^{-6} \text{ (experimentell).} \end{aligned}$$

<sup>1)</sup> J. Herweg, ZS. f. Phys. 3, 36, 1920.

Diese Werte sind zu berichtigen. Bei dem oberen ist versehentlich der Faktor  $\pi$  fortgelassen, und der untere Wert stellt nicht  $\Delta\varepsilon$ , sondern  $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$  dar, er ist also noch mit 4,35 zu multiplizieren. Die so korrigierten Werte lauten dann:

$$\begin{aligned} 28 \cdot 10^{-6} & \text{ (theoretisch),} \\ 28,3 \cdot 10^{-6} & \text{ (experimentell).} \end{aligned}$$

Wie in der früheren Arbeit schon angedeutet, ist aber der experimentell gefundene Wert noch zu erhöhen, da der Kondensator, welcher das zu untersuchende Dielektrikum enthält, nicht die ganze Kapazität des Schwingungskreises darstellt. Die Spulen und Zuleitungen enthalten ebenfalls eine gewisse Kapazität, und diese wirkt verkleinernd auf das Endresultat. Wir kommen noch auf diese Kapazität zurück.

In der vorliegenden Arbeit haben wir uns zum Ziel gesetzt, unter Berücksichtigung der erkannten Fehlerquellen einmal einen möglichst genauen Wert für  $m$  zu bestimmen und sodann die eingangs angeführte Gleichung durch Veränderung von  $N$  und  $T$  einer weiteren Prüfung zu unterziehen.

I. Die Bestimmung von  $m$ . Nach  $m$  aufgelöst lautet die Formel:

$$m^4 = \frac{15 k^3 T^3 (1 - \Theta)^4}{4 \pi N} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}.$$

Die Größe  $\Delta\varepsilon$  ist durch die Messung in folgender Weise zu ermitteln: Zwischen der Kapazitätsänderung und der Änderung der Schwingungszahl eines ungedämpften Schwingungskreises besteht unter Zugrundelegung der Thomsonschen Formel bei konstant gehaltener Selbstinduktion die Beziehung

$$\frac{\Delta C}{C} = -2 \frac{\Delta n}{n} \quad (2)$$

oder, wenn es sich um einen Kondensator mit Dielektrikum  $\varepsilon$  handelt,

$$\frac{\Delta\varepsilon C_0}{\varepsilon C_0} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = -2 \frac{\Delta n}{n},$$

vorausgesetzt, daß sich die Dimensionen des Kondensators nicht ändern. Für  $\Delta\varepsilon$  folgt

$$\Delta\varepsilon = 2 \varepsilon \frac{\Delta n}{n}. \quad (3)$$

Vom Vorzeichen können wir absehen, da es uns im folgenden nur auf den absoluten Wert ankommt. In der Formel bedeutet  $n$  die Schwingungszahl im Schwingungskreise und  $\Delta n$  ihre Änderung

d. h. nach dem in den früheren Arbeiten Gesagten die Anzahl der Schwebungen/sec, die man im Telephone  $U$  hört, wenn bei dem Felde 0 auf Schwebungsfreiheit eingestellt war und nun die hohe Spannung  $E$  an die mittlere Platte des Kondensators  $C_m$  angelegt wird <sup>1)</sup>.

Die auftretenden Schwebungen wurden durch den sehr kleinen variablen Kondensator  $C'$  kompensiert. Zum Nachweise der Kompensation diente ein Oszillograph, der mit dem Telephone  $U$  in Serie eingeschaltet war. (In der Figur nicht gezeichnet.) Es wurde auf

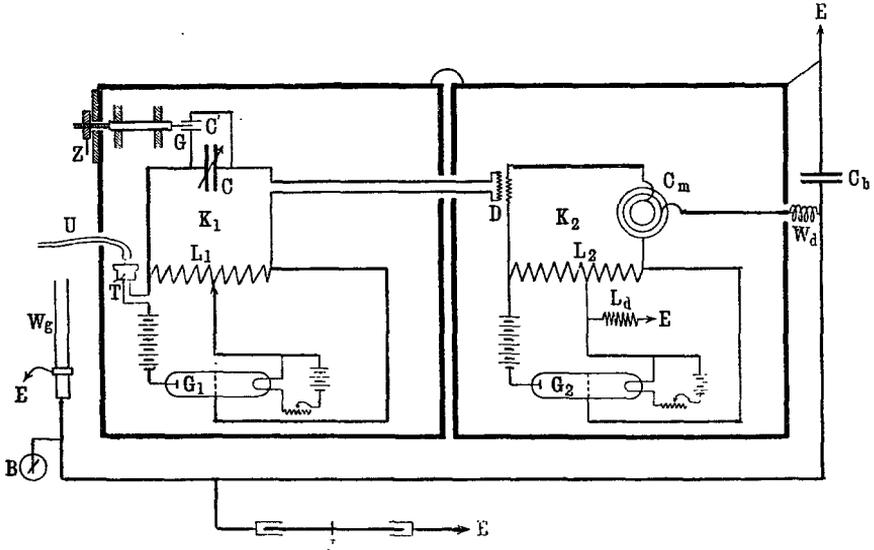


Fig. 1.

Maximalamplitude eingestellt; die Resonanzschärfe war recht befriedigend, so daß  $1/4$  Schwebung/sec nachgewiesen werden konnte.

Die Eichung der Skala des Kondensators  $C'$  bei  $Z$  in Schwebungen wurde, wie früher beschrieben, durch Abzählen mit der Stoppuhr bewirkt.

Es soll nun an einem Beispiel gezeigt werden, wie  $\Delta\varepsilon$  gewonnen und das Moment  $m$  des reinen Äthyläthers bestimmt wurde, um einen Einblick in die Genauigkeit der Methode und die zu berücksichtigenden Fehlerquellen zu geben.

Der benutzte Äther war zur Befreiung von Peroxyd mit Silberoxyd gekocht, mit Chlorcalcium und Natrium getrocknet und dreimal destilliert.

<sup>1)</sup> Die Figur ist identisch mit der in der Arbeit in ZS. f. Phys. 3, 41, 1920, woselbst auch die eingehende Erklärung einzusehen ist.

1. Eichung der Skala des Kondensators  $C'$ . Nachdem mit Hilfe eines nicht gezeichneten kleinen variablen Hilfskondensators auf Schwebungsfreiheit eingestellt war, wurde Zeiger  $Z$  des Kondensators  $C'$  auf Teilstrich 10, 20 usf. gedreht und jedesmal die Zahl der auftretenden Schwebungen innerhalb 5 Sekunden gezählt.

Die Zahl der Schwebungen variiert mit der Wellenlänge. Bei Untersuchung von Gemischen und Messungen bei verschiedenen Temperaturen arbeitet man mit etwas anderen Wellenlängen, es wurde daher vor jedem Versuch zur Kontrolle eine Bestimmung der Zahl der Schwebungen ausgeführt. Bei dem vorliegenden Beispiel war die Wellenlänge 285 m, die Zahl der Schwebungen gibt Tabelle 1.

Tabelle 1.

Teilstrich	Zahl der Schwebungen in 5 sec					Mittel
10	13	12	12	11	13	12,3
	12	13	12	12	13	
20	24	25	24	25	24	24,3
	24	25	23	25	24	

Hieraus ergibt sich:

$$1 \text{ Teilstrich} = 0,244 \text{ Schwebungen/sec.}$$

2. Die Messung von  $\Delta \varepsilon$ . Es wurde zunächst wieder ohne Feld auf Schwebungsfreiheit eingestellt bzw. auf Maximalamplitude des Oszillographen, die hiermit übereinstimmte.

Nun wurden in unserem speziellen Falle durch langsames Einschalten des Widerstandes  $W_g$  6000 Volt an den mittleren Zylinder des mit Äther gefüllten Kondensators  $C_m$  gelegt und die auftretenden Schwebungen durch Veränderung des Kondensators  $C'$  kompensiert.

Die Messung wurde zwölfmal hintereinander ausgeführt. Die Kompensation erfolgte bei den Teilstrichen:

11,5 10,5 10,5 10 11,5 13,5 11,5 9 11, 11,5 11 12,5  
im Mittel also bei 11,17. Da nun, wie oben gezeigt,

$$1 \text{ Teilstrich} = 0,244 \text{ Schwebungen/sec,}$$

so sind

$$11,17 \text{ Teilstriche} = 2,725 \text{ Schwebungen/sec} = \Delta n.$$

Die Schwingungszahl  $n$  war entsprechend der Wellenlänge 285 m  $= 1,05 \cdot 10^6$ , die Dielektrizitätskonstante bei der gemessenen Temperatur von  $18^\circ = 4,35$ . Es berechnet sich also

$$\Delta \varepsilon = 2 \varepsilon \frac{\Delta n}{n} = \frac{2 \cdot 4,35 \cdot 2,725}{1,05 \cdot 10^6} = 22,58 \cdot 10^{-6}.$$

Dieser Wert für  $\Delta \varepsilon$  bedarf noch einer Korrektur.

Wie schon in der früheren Arbeit erwähnt, stellt der Ätherkondensator  $C_m$  nicht die ganze Kapazität der Schwingungsanordnung dar, ein Teil liegt in der Spule  $L_2$  der Röhre und den Verbindungsleitungen. Das Verhältnis dieser Kapazität zur Kapazität  $C_m$  wurde durch Zuschaltung bekannter Kapazitäten und Bestimmung der jeweiligen Wellenlänge mittels Wellenmesser ermittelt. Es betrug bei der Wellenlänge 285 m 39 Proz.

$\Delta \varepsilon$  ist also noch um 39 Proz. zu vergrößern und man erhält dann

$$\Delta \varepsilon = 31,39 \cdot 10^{-6}.$$

3. Die Berechnung von  $m$ . In die Formel

$$m = \sqrt[4]{\frac{15 k^3 T^3 (1 - \Theta)^4 \Delta \varepsilon}{4 \pi N \mathbb{C}^2}} \quad (4)$$

sind in unserem speziellen Falle folgende Werte einzusetzen:

$$k = \text{Plancksche Konstante} = 1,346 \cdot 10^{-16}.$$

$$T = 291.$$

$$\Theta = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}, \text{ wo } \varepsilon = 4,35.$$

$$N = 6 \cdot 10^{21} \text{ (berechnet aus der Dichte des Äthyläthers 0,717 bei } 18^\circ \text{ und der Planckschen Zahl } 6,175 \cdot 10^{23} \text{ Moleküle im Grammolekül).}$$

$$\mathbb{C}_{\text{abs.}} = 88,66, \text{ entsprechend 5850 Volt auf 2,2 mm Zylinderabstand.}$$

$$\Delta \varepsilon = 31,39 \cdot 10^{-6}.$$

Es ergibt sich dann für  $m$  der Wert:

$$m = 12,42 \cdot 10^{-19}.$$

In gleicher Weise wurden die Momente bei 4000, 8000 und 10000 Volt bestimmt. Die erhaltenen Werte liegen zwischen 12,20 und 12,66 mit dem Mittel 12,46; sie sind also im Durchschnitt etwa 6 Proz. größer, als der von Debye in seiner Arbeit<sup>1)</sup> angegebene Wert  $11,8 \cdot 10^{-19}$ . Nun ist aber noch eine heimliche Fehlerquelle in den Messungen enthalten. Es ist die adiabatische Erwärmung des Äthers bei der Messung. Debye setzt bei seinen theoretischen Überlegungen, die in etwas ausführlicherer Form von Ratnowsky<sup>2)</sup> veröffentlicht wurden, eine isotherme Messung der Dielektrizitätskonstante voraus. Die auf der Debyeschen Theorie fußende Gleichung (4) rechnet daher auch mit einer isothermen Messung des  $\Delta \varepsilon$ .

Tatsächlich ist bei den schnellen Schwingungen die Messung eine adiabatische, und es ist daher an dem  $\Delta \varepsilon$  noch eine Korrektur anzubringen, die der adiabatischen Erwärmung des Äthers bei der

<sup>1)</sup> P. Debye, Phys. ZS. 13, 97, 1912.

<sup>2)</sup> Ratnowsky, Verh. d. D. Phys. Ges. 15, 497, 1913.

Messung Rechnung trägt und die, wie wir sehen werden, keineswegs zu vernachlässigen ist.

4. Ermittlung der adiabatischen Korrekturgröße<sup>1)</sup>. Erregt man in einem Kondensator mit Dielektrikum von der Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon$  isotherm ein elektrisches Feld, so gilt für die gelieferte latente Wärme  $Q$  die zuerst von Helmholtz für spezielle Fälle abgeleitete, später von Nernst<sup>2)</sup> verallgemeinerte Beziehung:

$$Q = T \frac{\partial F}{\partial T}, \quad (1)$$

worin  $T$  die absolute Temperatur und  $F$  die freie Energie. Die partielle Differentiation nach  $T$  bedeutet in unserem Falle, daß die Ladung des Kondensators konstant gehalten werde.

Ist  $e$  die Ladung, so ist die Spannung  $V = e/C$  und daher

$$F = \frac{e^2}{2C} = \frac{e^2}{2C_0 \varepsilon}$$

$$\frac{\partial F}{\partial T} = -\frac{e^2}{2C_0 \varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} = -\alpha \cdot F,$$

wenn wir mit  $\alpha$  den Temperaturkoeffizienten der Dielektrizitätskonstante bezeichnen. Mit Rücksicht auf (1) folgt

$$Q = -\alpha T F. \quad (2)$$

Wir fragen: Welchen Einfluß hat diese Wärmemenge auf die Dielektrizitätskonstante?

Die Energie  $F$  pro cem des Dielektrikums ist in praktischen Einheiten (Volt/cm) ausgedrückt

$$F = 1/2 \cdot 0,884 \cdot 10^{-13} \varepsilon \text{ } \mathfrak{E}^2 \quad (3)$$

und nach (2)

$$Q = 1/2 \cdot 0,884 \cdot 10^{-13} T \alpha \varepsilon \text{ } \mathfrak{E}^2 \text{ Joule}$$

(das -- Zeichen können wir gleich fortlassen, da  $\alpha$  negativ) oder

$$Q = 1/2 \cdot 0,884 \cdot 10^{-13} \cdot 0,239 T \alpha \varepsilon \text{ } \mathfrak{E}^2 \text{ cal.}$$

Die Temperaturerhöhung des Dielektrikums ist also:

$$\delta T = 1/2 \cdot 0,884 \cdot 0,239 \cdot 10^{-13} \frac{T \alpha \varepsilon}{s \cdot c} \text{ } \mathfrak{E}^2.$$

$s$  = spezifisches Gewicht,  $c$  = spezifische Wärme des Dielektrikums. Diese Temperaturerhöhung mit  $\alpha$  multipliziert ergibt die adiabatische Verkleinerung der Dielektrizitätskonstante.

<sup>1)</sup> Die folgenden theoretischen Überlegungen verdanken wir einer persönlichen Mitteilung des Herrn Mie.

<sup>2)</sup> Nernst, Theoret. Chemie, 8. Aufl., 1921, S. 26 ff.

Bezeichnet man mit  $\varepsilon_{\text{ad}}$  und  $\varepsilon_{\text{is}}$  die adiabatisch bzw. isotherm gemessenen Dielektrizitätskonstanten, so folgt

$$\varepsilon_{\text{ad}} = \varepsilon_{\text{is}} \left( 1 - \frac{1}{2} 0,884 \cdot 0,239 \cdot 10^{-13} \frac{T \alpha^2 \varepsilon}{s \cdot c} \mathfrak{E}^2 \right). \quad (4)$$

Diese Formel ist aber für unseren Zweck noch nicht anwendbar. Sie gilt für den Fall, daß eine Spannung  $\mathfrak{E}$  plötzlich an den Kondensator gelegt wird.

Bei unseren Messungen wird eine sehr hohe isotherm angelegte Gleichspannung von einer Wechselfspannung sehr kleiner Amplitude (der elektrischen Schwingung) überlagert. Die Gleichspannung liegt zwischen 2000 und 10000 Volt, die Amplitude der Schwingungen unter 20 Volt. Es ist also  $\Delta \mathfrak{E}$  klein gegen  $\mathfrak{E}$ . Setzen wir

$$\left( \frac{\Delta \mathfrak{D}}{\Delta \mathfrak{E}} \right)_{T \text{ const}} = \varepsilon_{\text{is}},$$

so gilt, wenn sich die Temperatur erhöht,

$$\Delta \mathfrak{D} = \varepsilon_{\text{is}} \Delta \mathfrak{E} + \varepsilon_{\text{is}} \mathfrak{E} \underbrace{\frac{1}{\varepsilon_{\text{is}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}}_{\alpha} \delta T. \quad (5)$$

Nun ist

$$\delta T = \frac{\delta Q}{s \cdot c} = \frac{-\alpha T \Delta F}{s \cdot c} \quad (6)$$

[nach (15)] und nach (3)

$$\frac{\Delta F}{F} = 2 \frac{\Delta \mathfrak{E}}{\mathfrak{E}},$$

in (6) eingesetzt

$$\delta T = - \frac{2 \alpha T}{s \cdot c} \cdot \frac{F \Delta \mathfrak{E}}{\mathfrak{E}}. \quad (7)$$

Unter Berücksichtigung von (7) geht (5) über in

$$\Delta \mathfrak{D} = \varepsilon_{\text{is}} \Delta \mathfrak{E} - 2 \varepsilon_{\text{is}} \frac{\alpha^2 T F}{s \cdot c} \Delta \mathfrak{E} \quad (8)$$

oder nach Einführung von (3)

$$\frac{\Delta \mathfrak{D}}{\Delta \mathfrak{E}} = \varepsilon_{\text{is}} \left( 1 - 0,884 \cdot 0,239 \cdot 10^{-13} \frac{T \alpha^2 \varepsilon}{s \cdot c} \mathfrak{E}^2 \right)$$

und schließlich

$$\varepsilon_{\text{ad}} - \varepsilon_{\text{is}} = [\Delta \varepsilon]_{\text{ad}} = - 0,884 \cdot 0,239 \cdot 10^{-13} \frac{T \alpha^2 \varepsilon^2}{s \cdot c} \mathfrak{E}^2, \quad (9)$$

die Verkleinerung der Dielektrizitätskonstante infolge adiabatischer Erwärmung des Dielektrikums. Diese ist doppelt so groß wie nach (4)

Wir wollen jetzt diese Korrekturgröße für unseren speziellen Fall ausrechnen. Es ist einzusetzen:

$$T = 291, \quad \alpha = 0,0046, \quad \varepsilon = 4,35, \\ s = 0,717, \quad c = 0,54, \quad \mathcal{E} = 5850 \text{ Volt}$$

und es ergibt sich

$$[\Delta\varepsilon]_{\text{ad}} = 4,50 \cdot 10^{-6}.$$

Um diesen Bruchteil erscheint der auf S. 5 am Ende von Abschnitt 2 angegebene gemessene Wert für  $\Delta\varepsilon$  zu groß, da Dipoleffekt und Wärmeeffekt in demselben Sinne wirken. Der korrigierte Wert von  $\Delta\varepsilon$  lautet also

$$\Delta\varepsilon = 31,39 \cdot 10^{-6} - 4,5 \cdot 10^{-6} = 26,89 \cdot 10^{-6}.$$

Legt man diesen Wert der Berechnung von  $m$  zugrunde, so erhält man statt 12,42 das Resultat

$$m = 11,95 \cdot 10^{-19}.$$

Die in dieser Weise korrigierten, bei verschiedenen Spannungen erhaltenen Werte von  $m$  sind in Tabelle 2 enthalten.

Tabelle 2.

Spannung Volt	$m \cdot 10^{19}$		
10 000	12,03	—	12,05
8 000	11,76	12,02	11,69
6 000	12,13	11,95	12,15
4 000	12,23	—	—

Als Mittel hieraus ergibt sich

$$m = 12,00 \cdot 10^{-19},$$

ein um rund 2 Proz. größerer Wert, als ihn Debye aus der Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante bestimmt hat. Lertes<sup>1)</sup> findet nach einer anderen Methode  $m = 12,7 \cdot 10^{-19}$ .

Nicht berücksichtigt ist bei dieser adiabatischen Korrektur die Wärme, welche durch das Anlegen des starken Feldes an den Kondensator entsteht. Diese ist zu vernachlässigen, denn erstens ist sie nach 4. nur halb so groß wie die berücksichtigte, und zweitens wurde das Feld durch Einschalten des Widerstandes  $W_g$  so langsam angelegt, daß der größte Bruchteil der Wärmemenge von den Metallmassen des Kondensators aufgenommen und zum Teil durch die kupfernen Zuleitungen nach außen abgeführt wurde.

II. Die Prüfung der Gleichung  $\Delta\varepsilon = \frac{4\pi N m^4}{15 k^3 T^3} \frac{\mathcal{E}^2}{(1 - \Theta)^4}$  durch Veränderung von  $N$ . Die Änderung der Zahl der Dipole

<sup>1)</sup> Lertes, ZS. f. Phys. 6, 65, 1921.

im Kubikzentimeter geschah in der Weise, daß dem Äther eine dipolfreie Substanz, Benzol, in bekannten Mengen zugesetzt wurde. Von diesen Mischungen wurde  $\Delta\epsilon$  gemessen, wie im Abschnitt I, 2. beschrieben. Sodann wurde nach obiger Gleichung  $\Delta\epsilon$  in folgender Weise berechnet:

Für  $N$  wurde ein Wert eingesetzt, wie er sich für die Mischung berechnet, unter der Annahme, daß die Zahl der Dipole der Mischungsregel folgt, also z. B. bei 50 Proz. Benzolzusatz  $N$  halb so groß ist wie bei reinem Äther. Ebenso wurde für die Berechnung von  $\epsilon$ , das in dem  $\Theta$  enthalten ist, die Gültigkeit der Mischungsregel vorausgesetzt. Für  $m$  schließlich wurde der unkorrigierte Mittelwert 12,46 eingesetzt.

Von der adiabatischen Korrektur wurde Abstand genommen, da einmal die zu ihrer Berechnung erforderlichen Größen für die Mischungen nicht genügend bekannt waren und sie außerdem bei diesen nur relativen Messungen keine ausschlaggebende Rolle spielt. Die bei verschiedenen Spannungen und Zimmertemperatur gemessenen und berechneten Werte von  $\Delta\epsilon \times 10^6$  sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3.

Spannung Volt	Äther, rein		Mischung Benzol—80 Proz. Äther		Mischung Benzol—60 Proz. Äther		Mischung Benzol—40 Proz. Äther	
	ber.	gemessen	ber.	gemessen	ber.	gemessen	ber.	gemessen
9750	87,4	88,52	53,77	50,68	30,49	27,47	14,83	16,11
7800	55,94	51,29	34,42	32,28	19,51	17,59	9,49	9,74
5850	31,47	32,74	19,36	18,33	—	—	—	—

Wie man sieht, stimmen die berechneten und gemessenen Werte recht befriedigend überein. Aus dieser Übereinstimmung darf man wohl nach unserer Ansicht den Schluß ziehen, daß die Dipole im reinen Äthyläther bei Zimmertemperatur jedenfalls in hohem Maße nicht assoziiert sind und sich nicht wesentlich gegenseitig beeinflussen. Täten sie das, so müßte ein Gangunterschied zwischen den berechneten und gemessenen Werten auftreten. Die vorhandenen Unterschiede liegen innerhalb der Fehlergrenzen.

III. Die Prüfung der Gleichung für  $\Delta\epsilon$  durch Veränderung der Temperatur  $T$ . Die Messungen von  $\Delta\epsilon$  wurden angestellt bei den absoluten Temperaturen 289, 273, 258, 236 und 194. Die Temperatur 258 wurde mittels Eis und Kochsalz, 236 mittels Eis und Chlorcalcium und 194 schließlich mit fester Kohlensäure und Äther erreicht.

Die Mischungen, in die der Kondensator  $C_m$  eintauchte, befanden sich in einem Dewarschen Gefäß. Gewisse Schwierigkeiten machten nur die Messungen bei 194 abs. Die Temperatur war nicht in der erwünschten Weise konstant zu halten und dieser Umstand hatte dauernde geringe Tonänderungen im Telephon zur Folge, und außerdem ließ sich eine starke Eisbildung an den Zuleitungen durch gutes Trocknen der Luft nur schwer ganz beseitigen. Es sind daher die bei 194 abs. gemessenen Werte von  $\Delta\varepsilon$  nur als erste Annäherungen zu betrachten. Auch hier sollen, wie im vorigen Abschnitt, den gemessenen die berechneten Werte von  $\Delta\varepsilon$  gegenübergestellt werden. Bei der Berechnung wurde auch hier von der adiabatischen Korrektur aus denselben Gründen wie in Abschnitt II Abstand genommen.

Die Messungen wurden mit einer anderen Apparatur und einem anderen Meßkondensator, allerdings von nahe den gleichen Dimensionen (2,2 mm Zylinderabstand) wie oben ausgeführt. Für  $m$  ergab sich bei Zimmertemperatur der unkorrigierte Mittelwert 12,58, der um etwa 1 Proz. größer ist als der oben angegebene. Die Abweichung rührt vermutlich von der Ausmessung des Meßkondensators  $C_m$  her. Wird der Zylinderabstand etwa um  $\frac{2}{100}$  mm größer bestimmt, so ergibt sich schon die obige Abweichung, doch liegt diese weit innerhalb der Fehlergrenzen.

Jedenfalls wurde der Berechnung von  $\Delta\varepsilon$  dieser Wert 12,58 zugrunde gelegt.  $N$  ergab sich für die verschiedenen Temperaturen aus den entsprechenden Dichten des Äthers und der Planckschen Zahl, und  $\varepsilon$ , das in dem  $\Theta$  enthalten, wurde aus dem Landolt-Börnstein eventuell durch Interpolation entnommen. Die so berechneten und gemessenen Werte von  $\Delta\varepsilon$  bei verschiedenen absoluten Temperaturen zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4.

Spannung	289		273		258		236		194	
	be-rechnet	ge-messen								
8000	74,8	72,51	109,2	111,4	160,2	155,75	309,4	301,4	—	—
6000	42,08	42,33	61,41	63,17	90,14	87,6	173,9	170,0	679,0	370
4000	18,7	19,23	27,3	27,14	40,06	39,35	77,36	76,62	301,3	180
2000	—	—	6,82	7,02	10,01	9,70	19,32	19,15	—	—

Man sieht, daß bis zur Temperatur 236 abs. die berechneten und gemessenen Werte recht gut übereinstimmen. Bei 194 dagegen tritt eine auffallende Abweichung ein, derart, daß die gemessenen Werte bedeutend kleiner sind als die berechneten. Bei genauerer Betrachtung

scheint diese Abweichung auch schon früher in ganz geringem Maße vorhanden.

Während bei 289 und 273 abs. die gemessenen Werte bald größer, bald kleiner sind als die berechneten, sind sie bei 258 und 236 schon durchweg kleiner; allerdings liegt diese Abweichung noch innerhalb der Fehlergrenzen. Sehr gut tritt die Art der Abweichung in den Kurven der Fig. 2 hervor.

Als Abszissen sind die Temperaturen nach fallenden Werten, als Ordinaten die  $\Delta\varepsilon \times 10^6$  aufgetragen; die Kreise stellen die berechneten, die Kreuze die gemessenen Punkte dar.

Die Resultate zeigen, daß unsere Formel für  $\Delta\varepsilon$  die Verhältnisse bis etwa 240 abs. recht befriedigend darstellt, daß sie dagegen

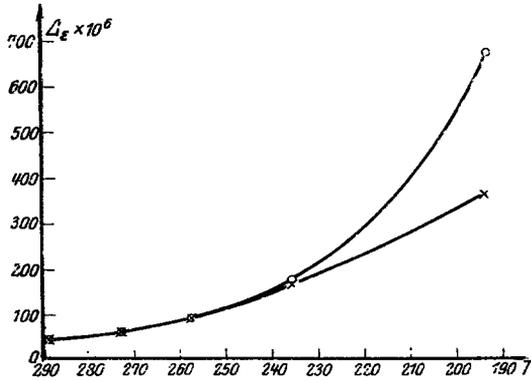


Fig. 2.

bei tieferen Temperaturen ihre Gültigkeit verliert. Dasselbe gilt für die Theorie von Debye, aus der die Beziehung für  $\Delta\varepsilon$  abgeleitet ist.

Der Grund für die Abweichungen ist vermutlich zu suchen in Dichteänderungen und damit verbundenen Änderungen der molekularen Felder<sup>1)</sup>, die ja Debye in seiner Theorie vernachlässigt.

#### Zusammenfassung.

1. Es wird das Dipolmoment des Äthermoleküls bestimmt. Der unkorrigierte Mittelwert beträgt  $12,46 \cdot 10^{-19}$ .

2. Dieser Wert ist einer Korrektur zu unterziehen, da der Äther sich bei der Messung adiabatisch erwärmt. Die adiabatische Korrektur wird berechnet. Der korrigierte Mittelwert lautet:  $12,0 \cdot 10^{-19}$ .

<sup>1)</sup> Gans u. Isnardi, Phys. ZS. 22, 230, 1921.

3. Die Beziehung  $\Delta \varepsilon = \frac{4\pi Nm^4}{15 k^3 T^3} \frac{\mathcal{E}^2}{(1 - \theta)^4}$  wird unter Veränderung von  $N$  und  $T$  einer Prüfung unterzogen und in bestimmten Grenzen bestätigt.

4. Bei tiefen Temperaturen treten Abweichungen auf, die vermutlich durch Änderungen der molekularen Felder zu erklären sind.

Halle a. d. S., Physik. Institut der Universität, Oktober 1921.

Anmerkung bei der Korrektur. Wie uns Herr Dr. Lertes freundlichst mitteilte, erscheint in dieser Zeitschrift eine Erwiderung von Herrn C. Bergholm auf eine Arbeit des Herrn Dr. Lertes, in der auch eine frühere Arbeit des einen von uns <sup>1)</sup> einer gewissen Kritik unterzogen wird.

Herr Bergholm meint nämlich, daß die beobachtete Wirkung des elektrischen Feldes möglicherweise nur ein Temperatureffekt sei.

Wir glauben, daß diese Ansicht durch die vorliegende Arbeit wohl hinreichend widerlegt ist.

Halle a. d. S., Physik. Institut der Universität, November 1921.

---

<sup>1)</sup> J. Herweg, l. c.