

KONINKLIJKE AKADEMIE VAN WETENSCHAPPEN
TE AMSTERDAM.

Dr. FRITZ HASENOEHL.

„Die Dielectricitäts-constante von verflüssigtem Stickoxydul und Sauerstoff“

Overgedrukt uit: Verslag van de Gewone Vergadering der Wis- en
Natuurkundige Afdeeling van 30 September 1899.

(Verschenen 12 October 1899).

Natuurkunde. — De Heer KAMERLINGH ONNES, biedt aan Mededeeling N^o. 52 uit het Natuurkundig Laboratorium te Leiden: Dr. FRITZ HASENOEHL: „*Die Dielektricitätsconstante von verflüssigtem Stickoxydul und Sauerstoff.*”

Messungen über die Dielektricitätsconstante verflüssigter Gase sind bisher von LINDE ¹⁾ und von DEWAR und FLEMING ²⁾ unternommen worden. Die Messungen von LINDE beziehen sich auf Gase, welche

¹⁾ LINDE, Wied. Ann. 56 pag. 546.

²⁾ DEWAR und FLEMING, Proc. Roy. Soc. Dec. '96.

durch Anwendung von hohem Druck bei relativ hoher Temperatur verflüssigt werden und sind mit der vorliegenden Arbeit nicht in directem Zusammenhang. Dagegen haben DEWAR und FLEMING die Dielektricitätsconstante des verflüssigten Sauerstoffes unter denselben Bedingungen untersucht, wie ich; nämlich bei der Temperatur des normalen Siedepunktes unter atmosphärischen Druck.

Die Verflüssigung der Gase geschah im cryogenen Laboratorium des physikalischen Institutes zu Leiden. Die Einrichtung desselben ist an anderer Stelle geschildert¹⁾; ich kann mich also hier darauf beschränken die speziell zur Bestimmung von Dielektricitätsconstanten getroffenen Einrichtungen zu beschreiben, was im folgenden geschehen wird. Während der Versuche stand das cryogene Laboratorium stets unter der persönlichen Leitung des Herrn Professor KAMERLINGH ONNES, wodurch wohl allein das Zustandekommen meiner Versuche ermöglicht wurde. Es sei mir daher auch an dieser Stelle gestattet, demselben dafür, wie auch für manch andere werthvolle Hülfe meinen wärmsten und aufrichtigsten Dank auszusprechen.

1. Methode.

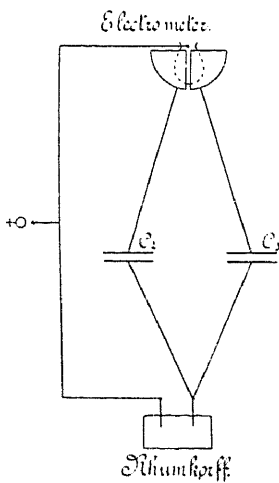


Fig. 1.

Die Methode, deren ich mich bedient habe, war eine Modification der GORDON'schen. Das Prinzip der letzteren wird aus dem Schema (Fig. 1) klar. Mit den beiden Quadrantenpaaren eines Elektrometers von THOMSON sind die inneren Belege zweier Condensatoren C_1 und C_2 verbunden, während die äusseren an den einen Pol eines Inductoriums geschlossen sind, dessen anderer Pol, sowie die Lemniskate des Elektrometers abgeleitet sind. Wird das Inductorium in Gang gesetzt, so gibt die Nadel nur dann keinen Ausschlag, wenn die Capacitäten C_1 und C_2 einander gleich sind. Ist dann etwa C_1 ein Messcondensator veränderlicher Capacität, so kann die Capacität von

C_2 mit verschiedenen Zwischenmedien bestimmt werden, woraus sich unmittelbar die Dielektricitätsconstante der letzteren ergibt. Dabei

¹⁾ KAMERLINGH ONNES, Comm. Phys. Lab. Leiden N^o. 14. MATHIAS, Le Laboratoire cryogène de Leyde, Rev. Gén. d. Sciences, 1896 p. 381, sqq. Und besonders KAMERLINGH ONNES, Meded. N^o. 51. Methoden en hulpmiddelen in gebruik bij het cryogeen laboratorium I. Diese Sitzung, vorige Mittheilung.

ist aber vorausgesetzt, dass einmal das Elektrometer vollständig symmetrisch construirt ist, und dass ferner die Capacität der Zuleitungsdrähte und der, der Induction nicht ausgesetzten, Theile der Condensatoren, auf beiden Seiten dieselbe ist. Die gleichzeitige Behebung dieser beiden Fehlerquellen bietet aber ziemliche Schwierigkeiten.

Bezeichnen wir nämlich mit γ_1 und γ_2 die Capacität der beiden Quadrantenpaare einschliesslich der Zuleitungsdrähte; mit p_1 und p_2 die für die Einwirkung der Quadranten auf die Nadel characteristischen Constanten (Differentialquotient des wechselseitigen Inductionscoefficienten nach dem Drehungswinkel); ferner seien C_1 und C_2 die Capacitäten der mit einander zu vergleichenden Condensatoren, c_1 und c_2 die Capacitäten der mit dem Electrometer verbundenen, der Induction jedoch nicht ausgesetzten Condensatortheile; dann ist die Bedingung für das Gleichgewicht der Nadel ¹⁾

$$\left(\frac{C_1}{c_1 + \gamma_1}\right)^2 p_1 = \left(\frac{C_2}{c_2 + \gamma_2}\right)^2 p_2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

Durch diese Gleichung ist aber die Gleichheit von C_1 und C_2 natürlich noch nicht erwiesen. Man hatte also etwa erst p_1 und p_2 nach bekantnen Methoden gleich zu machen. Ist dies geschehen, so vereinfacht sich Gleichung (1) zu

$$\left(\frac{C_1}{c_1 + \gamma_1}\right)^2 = \left(\frac{C_2}{c_2 + \gamma_2}\right)^2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (1')$$

Lässt man nun durch Umschalten C_1 und C_2 ihre Rolle vertauschen, und ändert bei gleichbleibenden p , γ durch hinzuschalten von Capacitäten so lange, bis dieses Umschalten das Gleichgewicht der Nadel nicht mehr alteriert, so besteht neben (1') noch die folgende Gleichung (2):

$$\left(\frac{C_2}{c_2 + \gamma_1}\right)^2 = \left(\frac{C_1}{c_1 + \gamma_2}\right)^2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (2)$$

Aus (1') und (2) folgt nun, dass $\gamma_1 = \gamma_2$ gemacht wurden muss, auch $c_1 = c_2$ sein muss um zu erhalten:

$$C_1 = C_2 .$$

Es wäre nun ziemlich schwierig gewesen, diese Grössen p und γ

¹⁾ Siehe MAXWELL Treatise, I 219.

mit der nöthigen Genauigkeit abzugleichen. Ferner ändern sich auch beide mit der Nulllage der Electrometernadel, und so hätte diese Arbeit oft wiederholt werden müssen, was gewiss sehr umständlich und zeitraubend gewesen wäre.

Um diesen Schwierigkeiten aus dem Wege zu gehen, habe ich die Methode lieber folgendermassen modificiert angewendet.

C_2 bleibt ein für alle Male ungeändert; C_1 ist ein Messcondensator, der so gestellt wird, dass sich die Nadel nicht bewegt, wenn das Inductorium in Gang gesetzt wird. Der Condensator, dessen Capacität gemessen werden soll, wird nun C_1 parallel geschaltet. Damit sich die Nadel des Electrometers wieder auf den Nullpunkt einstelle, muss die Capacität C_1 um eine messbare Grösse vermindert werden, welche dann eben der zu messenden Capacität gleich ist. Und nun hat man auf Symmetrie des Electrometers etc. keine Rücksicht mehr zu nehmen. Die einzige Voraussetzung ist, dass die Drähte, welche die zu messende Capacität dem Condensator C_1 parallel schalten, selber keine merkbare Capacität besitzen. Natürlich ist das nicht leicht zu erreichen, doch lassen sich die diesbezüglichen Correctionen, wie weiter unten folgt, verhältnissmässig leicht anbringen.

2. Beschreibung der einzelnen Apparate.

Das Elektrometer war ein THOMSON'sches in seiner ursprünglichen Form. Die Aufstellung desselben in der Nähe der im cryogenen Laboratorium thätigen Pumpen, forderte jedoch einen gegen Stösse und Trillungen wenig empfindlichen Apparat. Daher ersetzte ich die Schwefelsäuredämpfung durch eine Luftdämpfung nach TÖPLER und die bifilare Aufhängung an zwei Coconfäden durch einen ca. 70 cm. langen und 30μ dicken Platindraht, der ein viel bedeutenderes Gewicht zu tragen imstande ist. Nach diesen Veränderungen betragen die Schwankungen bei $3\frac{1}{2}$ m. Skalendistanz weniger als 0.1 mm., auch wenn in ca. 10 m. Distanz die Pumpen des Kälte-laboratoriums in Gang waren, während es bei der ursprünglichen Montierung unter solchen Umständen völlig unmöglich war, zu arbeiten.

Das Inductorium wurde von einem Wechselstrom gespeist, der etwa 200 Schwingungen in der Sekunde machte. Die Schlagweite an den Enden der sekundären Spule betrug etwa 0.05 mm.¹⁾

Als Messcondensator diente ein, zu diesem Zweck von NERNST²⁾

¹⁾ Vorbereitende Versuche ergaben dass Funken von mehrere Millimeter Länge beim Ueberspringen in flüssigem Stickoxydul, dasselbe, obgleich es endotherm ist, nicht zum Explodieren brachten.

²⁾ NERNST, Zeitschrift für physik. Chemie XIV. 4.

construierter, Apparat: zwei Metallplatten zwischen denen eine Glasplatte verschoben werden kann. Die Aenderung der Capacität ist bei idealer Construction der Verschiebung der Glasplatte proportional. In Wirklichkeit muss der Condensator erst geaicht werden.

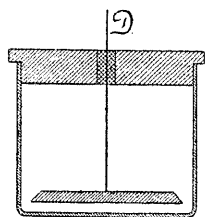


Fig. 2.

Dies geschah mit Hilfe eines eigens dazu construierten Aichcondensators, der sich von dem NERNST'schen Trogecondensator¹⁾ nur dadurch unterscheidet (siehe Figur 2) dass der Ebonitdeckel durch einen solchen von Metall und die Metallröhre, an welcher die innere Platte befestigt ist, durch einen 2 mm. dicken, steifen Draht *D* ersetzt ist, welcher letzterer vom Metalldeckel durch einen dünnen Ebonitpropf isoliert ist. Bei einem derart

construierten Condensator ist die Capacität der, der Induction nicht ausgesetzten, Theile verschwindend klein.

Bei der Construction des Experimentiercondensators, dessen Capacität in verflüssigten Gasen bestimmt werden sollte, waren zwei Gesichtspunkte massgebend. Einmal musste eine möglichst grosse Capacität in einem verhältnissmässig kleinen Raume untergebracht werden, und dann mussten die, der Induction nicht ausgesetzten, Theile der mit dem Elektrometer verbundenen Belege möglichst klein gemacht werden. Es wurde dies in der Art erreicht, welche in Tafel I deutlich gemacht ist, welche den Condensator sammt des zum Aufnehmen des flüssigen Gases bestimmten Bechers des Cryostaten in dem er montiert ist, in drei verschiedenen Durchschnitten²⁾ zeigt.

Die zwei äussersten Platten p_1 und p_2 sind durch die Mutter-schrauben s mit einander — durch den Stift t mit der Erde in leitender Verbindung. Die 3 Schrauben s stecken in passenden Glasröhren, auf welchen der eigentliche fünfplattige Condensator montiert ist. Die Platten desselben haben 3 cm. Radius und werden durch Glasstückchen von 1 mm. Höhe von einander gehalten. Um den dadurch entstehenden Fehler auf ein Minimum zu reducieren, mussten diese Glasstückchen möglichst klein genommen werden, u. z. erwies es sich als das Beste, dieselben aus einer Glasröhre von 1 mm. Diameter und ca. $\frac{1}{5}$ mm. Wanddicke zu schneiden und dann auf gleich schleifen zu lassen. Der erwähnte Fehler kann so endlich nicht mehr als 0.1 pCt. betragen, da er im Zähler und Nenner des Ausdrucks für die Dielektricitätsconstante in gleicher Weise auftritt.

¹⁾ NERNST, Zeitschrift für physik. Chemie XIV, 4.

²⁾ Der dritte Durchschnitt ist theilweise durch die Röhre g , theilweise durch die Röhre N gelegt.

Die 2^{te} und 4^{te} Platte sind mit dem Elektrometer, die 1^{ste}, 3^{te} und 5^{te} mit dem Pole des Inductoriums verbunden. Die dazu nöthigen Drähte d_1 und d_2 sind an der 1^{ten}, resp. 2^{ten} Platte festgelöthet, werden durch kleine Oeffnungen der darüber liegenden Platten gespannt und führen durch die Glasröhre g nach oben.

Mittels des Stiftes t ist der ganze Condensator am Deckel eines Hohlcylinders von Messing m befestigt, in welchem letzteren die zu untersuchende Flüssigkeit gebracht wird. Der Hohlcylinder und mit ihm die zwei äussersten Platten sind zur Erde abgeleitet ¹⁾.

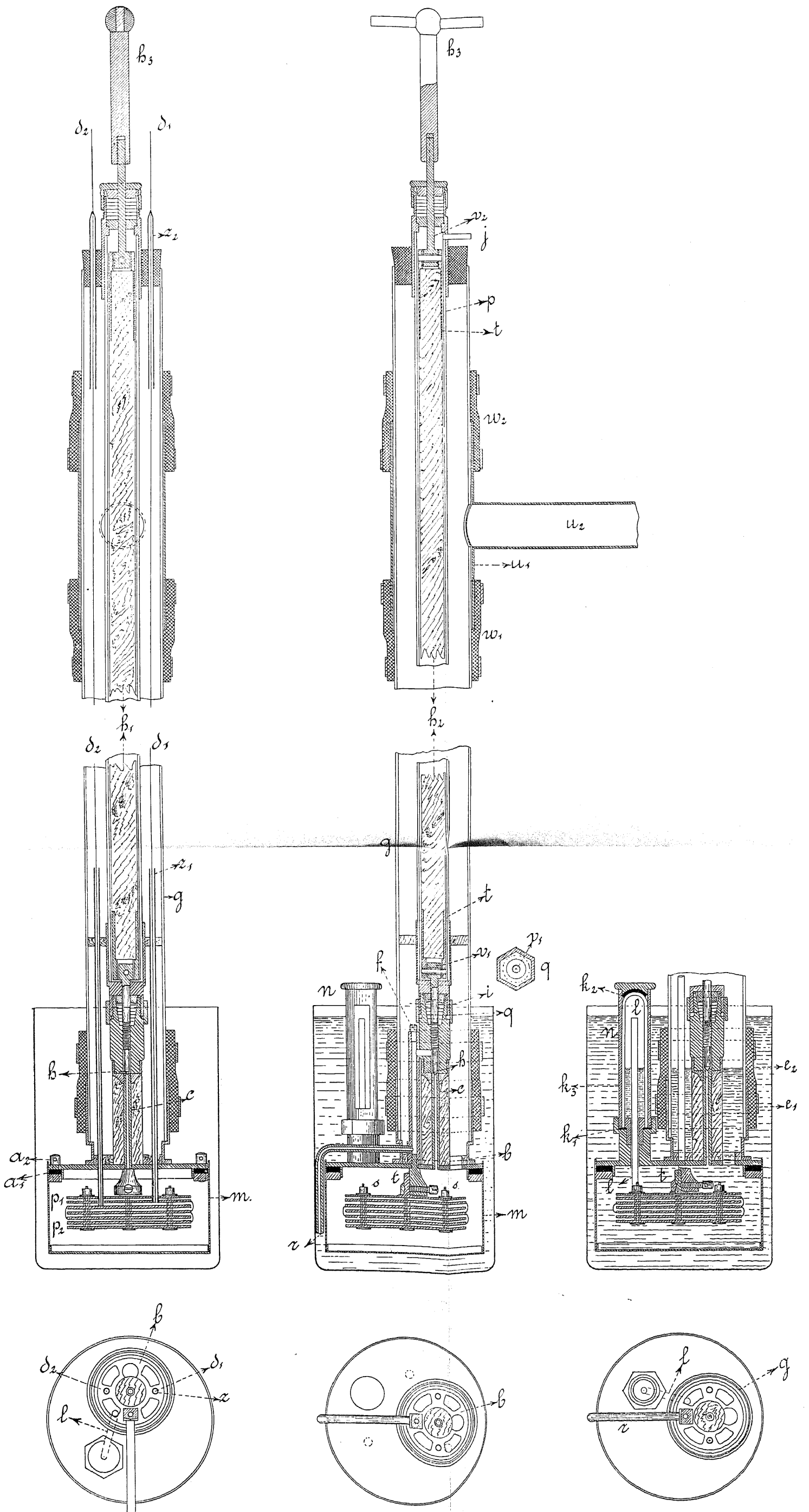
Es entstand nun die Frage in welcher Weise die Füllung des Condensators mit dem flüssigen Gase geschehen solle. Es war dabei Folgendes zu beachten. Der Condensator und Hohlcylinder muss gegen äussere Wärmezufuhr möglichst geschützt werden um die Bildung von Dampfblasen zu vermeiden und wird deshalb (an einem schlecht leitenden Träger) in dem Becher B_1 unter das flüssige Gas getaucht. Das verflüssigte Gas muss in genügender Menge zugeführt werden um den Condensator abzukühlen und abgekühlt zu erhalten, ferner darf es nicht mit der atmosphärischen Luft in Berührung kommen, da dies arge Verunreinigung zur Folge hätte; endlich muss noch dafür Sorge getragen werden, dass die abziehenden Dämpfe nicht verloren gehen. Dies Alles wird wohl am besten durch Anwendung eines Cryostaten (Kochflasche mit Kochkasten) erreicht, wie sie am hiesigen cryogenen Laboratorium für Messungen mit Hülfe eines verflüssigten Gases verwendet werden. Die Beschreibung derselben findet man an andrer Stelle ²⁾.

Ferner war noch Folgendes zu berücksichtigen: Das Princip der Methode ist, die Capacität desselben (geometrisch gleichen) Condensators in Luft und im fraglichen Medium zu bestimmen. Bestimmt man aber die Capacität des Luftcondensators bei Zimmertemperatur, die des Flüssigkeitcondensators bei der Temperatur des siedenden Gases, so haben sich auch die geometrischen Verhältnisse des Condensators in Folge der thermischen Dilatation und Verzerrung geändert, und in Anbetracht der grossen Temperaturdifferenz hätte so ein nicht unbeträchtlicher Fehler entstehen können.

Aus diesen Gründen wurde der Condensator im Inneren des oben-erwähnten Hohlcylinders von Messing derartig angebracht dass dieser Raum abgeschlossen, luftleer gepumpt und in verflüssigtem Gas abgekühlt werden konnte. In nachher zu beschreibender Weise konnte

¹⁾ Vergl. Tafel I bei Mitth. N^o. 51 diese Sitzung, 83, dem Draht ϕ .

²⁾ KAMERLINGH ONNES, l. c. insbesondere Mitth. N^o. 51 § 3, diese Sitzung vorige Mittheilung.



dann der den Condensator enthaltende leere Raum mit verflüssigtem Gas aus dem Becher gefüllt werden.

Es muss darauf geachtet werden dass die Zuleitungsdrähte, auch wenn man sie noch so dünn nimmt, stets eine merkbare Capacität repräsentieren, und die geringste Verschiebung der Apparate wirkliche Fehler ergiebt. Besonders auch um dieses zu vermeiden, war es also wünschenswerth, wie dies bei der ONNES'schen Methode der Benutzung flüssiger Gase zu Messungen gerade der Fall ist, den in verflüssigtes Gas zu tauchenden und mit letzterem zu füllenden Apparat in den geschlossenen Kochkasten in welchen das verflüssigte Gas direct abgeschenkt werden konnte, zu montiren, sodass die Manipulationen des Luftleerpumpes, des Abkühlens und des Füllens mit verflüssigtem Gas statt finden bei unveränderter Lage der Condensatortheile und Zuleitungsdrähte.

In welcher Weise der obenerwähnte Hohleylinder von Messing und mit ihm der Experimentiercondensator in die Kochflasche montiert wurde, ist aus Mitth N^o. 51 § 2 ersichtlich ¹⁾. Die weitere Einrichtung der Hülle des Condensators zeigt beigegebene Tafel I. Das Innere des Hohleylinders communiciert auf zwei Wegen nach aussen. Einmal durch die dünne Kupferröhre r , die nach den vom Hohleylinder nicht eingenommenen Theilen des Bechers führt. Diese Röhre kann mittels eines Hahnes, dessen Stift h von der Stange h und den Griff h_2 bewegt wird, von aussen abgeschlossen oder geöffnet werden.

Der zweite Weg nach aussen ist die Glasröhre g , durch welche die sich entwickelnden Dämpfe nach u abziehen können, um dann in Kautschuksäcken aufgefangen zu werden ²⁾.

Der Vorgang bei der Messung ist folgender. Anfangs ist der Hahn h geschlossen und man lässt das flüssige Gas in die Koch-

¹⁾ Tafel I dabei giebt eine ausführliche Zeichnung des Cryostaten mit dem Condensator, Tafel IV eine schematische Darstellung der Stickoxydulcirculation mit dem Cryostaten; für die Sauerstoffcirculation ist MATHIAS l. c. zu vergleichen.

²⁾ Weitere Zeichenerklärung: a_2 Schraubchen zum Andrücken der Packung a_1 , b Holzstückchen zum Stützen der Glasröhren z_1 welche die Drähte d_1 und d_2 durchlassen, c zweitheiliges Holzstück (schlecht wärmeleitend) zum Stützen des Zuflussröhrens, f eingelöthetes Schraubchen, benutzt bei der Bohrung des Kanals für verflüssigtes Gas, k_1 Packung unter der Niveaueigerröhre, k_2 Messingmontur zum Anschrauben derselben, k_3 , Lederkissen, e Kautschukröhre um die Glasröhre g an der Messinghülle des Condensators zu verbinden (mit Fischleim gegen das flüssige Gas geschützt), e_2 Messingreifen welche mit Schrauben angezogen werden um Verschluss zu erzielen, j , p , q Vergl. Mitth. N^o. 51 § 2, t_1 und t_2 Kupfermonturen um die Stahlstifte v_1 v_2 zu fassen, u_2 , u_1 , w_1 , w_2 vergl. Mitth. N^o. 51 § 2. Die seitliche Oeffnung in der Glasröhre g vor dem Seitenröhr u_2 des messingen T rohrs ist leicht zu sehen.

flasche einströmen. Hat sich dasselbe hier in genügender Menge gesammelt und kann man annehmen, dass sämmtliche Theile des Condensators die Temperatur des Gases angenommen haben, so wird das Innere des Hohlcyinders (durch die Glasröhre g) leergepumpt und hierauf die Capacität des Condensators bestimmt. Nun wird der Hahn h geöffnet und das flüssige Gas strömt in Folge des herrschenden Ueberdruckes in das Innere des Hohlcyinders. Ist dies geschehen, so wird der Hahn h wieder geschlossen und nun wird die Capacität des Condensators von Neuem, diesmal mit dem flüssigen Gase als Zwischenmedium bestimmt. ¹⁾

Um sich davon überzeugen zu können, dass der Hohlcyinder vollständig mit flüssigem Gase gefüllt sei, war die Anwendung der Niveauröhre N nöthig, in welcher der von aussen leicht sichtbare Meniskus anzeigt, wie hoch die Flüssigkeit im Hohlcyinder, resp. im daran anstossenden Theil der Glasröhre g steht. Die Glasröhre l , die von g nach N führt, bewirkt, dass die beiden Flüssigkeitsspiegel unter demselben Drucke stehen. ²⁾

Es war leider nicht möglich das Elektrometer und die sonstigen Hilfsapparate in dem Zimmer aufzustellen, in dem sich die Kältemaschinen befinden, aus Platzmangel sowohl als auch wegen der Unruhe, welche die laufenden Pumpen und ihre Bedienung nothwendiger Weise zur Folge haben. Ich hatte also blos die Wahl, entweder die Kochflasche mit dem darin enthaltenen Condensator in das Nebenzimmer, wo sich auch das Elektrometer befand, aufzustellen, oder die Kochflasche im Kältelaboratorium zu lassen und den Condensator durch einen entsprechend langen Draht mit dem Elektrometer zu verbinden. Im ersteren Falle hätte man das verflüssigte Gas durch eine etwa 5 m. lange Röhre in die Kochflasche führen müssen, wobei jedoch sehr bedeutende Wärmezufuhr von aussen nicht zu vermeiden gewesen wäre, so dass das Gelingen der Versuche vorderhand noch in Frage gestanden wäre. Daher wurde vorläufig die letztere Aufstellung vorgezogen, wobei natürlich die Empfindlichkeit der Methode etwas leidet, da ja der lange Zuleitungsdraht eine nicht unbedeutende Capacität repräsentiert. Doch schienen hier, wie schon gesagt, die Vortheile die Nachtheile zu überwiegen.

¹⁾ Der erste der drei Durchschnitte zeigt den Becher und den Condensator leer, der zweite den Becher gefüllt und der dritte den Becher und den Condensator beide mit verflüssigtem Gas gefüllt.

²⁾ Die Niveauröhre ist im zweiten Durchschnitte gedreht um l zu zeigen. Es ist die Niveauröhre Taf. I bei Mitth. no. 51 § 2 nicht gezeichnet, dieselbe wird durch K_2 (auf dieser Tafel) beobachtet.

Um den Einfluss des langen Zuleitungsdrahtes auszugleichen, erwies sich als nothwendig, über verschiedene Hilfscapacitäten zu verfügen. Dieselben wurden nach demselben Prinzip construiert, wie der Experimentiercondensator: Metallplatten, die auf Glasröhren aufgesteckt und durch Glasstückchen von einander gehalten werden. Diese so construierten Condensatoren wurden dann, durch eine Paraffinschichte isoliert in mit Staniol beklebte Pappen-deckelschachteln gelegt. Wird dann diese Staniolbekleidung zur Erde abgeleitet, so ist die Capacität des Condensators ganz unveränderlich und von dem Einschluss umgebender Körper unabhängig.

Solche Hilfscapacitäten können auch dienen wenn bei Substanzen mit grossere Dielektricitätsconstante die Verschiebung der Glastafel des NERNST'schen Messcondensators nicht mehr ausreicht, um die gewünschte Capacitätsänderung zu erreichen; in einem solchen Falle hätte man solche Capacitäten dem Messcondensator parallel zu schalten.

3. Versuchsanordnung.

Es wurden um von Veränderungen der Capacität der Zuleitungsdräthe herrührende Fehler auszuschliessen, alle Apparate unverrückbar — ein für alle Male — festgeklemmt. Aus denselben Gründen ist auch darauf zu achten, dass das An- und Abschalten der Condensatoren ganz gleichmässig erfolgt, was die Anwendung von Schaltbrettern erfordert, zu denen die Drähte fix gespannt hinlaufen und welche im Uebrigen möglichst capacitätslos construiert werden müssen. Und zwar verwendete ich als solche, ausschliesslich kleine Ebonitplatten, welche mit Quecksilbernapfen versehen waren, welche durch kleine Metallbügel in Verbindung gebracht werden konnten.

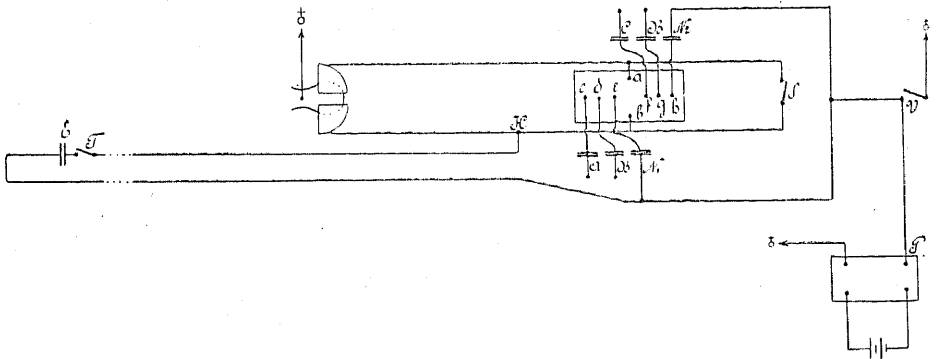


Fig. 3.

Die Versuchsanordnung ist in Figur 3 schematisch wiedergegeben. Von den beiden Quadrantenpaaren des Elektrometers führen zwei Drähte erst zu den zwei Quecksilbernäpfen a und b , ferner zum kleinen Schlüssel S durch den, behufs Fixierung des Nullpunktes die Quadranten in leitende Verbindung gebracht werden können; c, d, e, f, g, h sind weitere sechs Quecksilbernäpfe, von welchen Zuleitungsdrähte zu den inneren Belegen der sechs Condensatoren N_1, N_2, A, B, C, D führen; N_1 und N_2 sind zwei NERNST'sche Messcondensatoren, A, B, C, D sind Hilfscapacitäten, deren Construction bereits beschrieben wurde. Die äusseren Belege dieser letzteren vier Condensatoren können je nach Bedarf zur Erde oder zum Rhumkorffpol P geleitet werden, während die von N_1 und N_2 stets mit letzterem in Verbindung sind. Wird der Schlüssel V geschlossen, so sind sämtliche Condensatorenbelege zur Erde abgeleitet.

Bei H zweigt ein Draht ab, der in das Nachbarzimmer geführt ist und durch den Schlüssel T mit der inneren Belegung des Experimentiercondensators E verbunden werden kann. Die äussere Belegung des letzteren ist stets mit dem Rhumkorffpol in Verbindung.

Dass ein zweiter Messcondensator (N_2 in der Figur) in Verwendung kam, obwohl das Prinzip der Methode nur einen solchen fordert, geschah theils aus Bequemlichkeitsrücksichten, theils wegen der sofort zu beschreibenden Aichung des eigentlichen Messcondensators (N_1).¹⁾

4. Aichung de Messcondensators.

Der Messcondensator war, wie bereits erwähnt ein von NERNST construirter Apparat. Die Aenderung der Capacität ist der Verschiebung der Glasplatte proportional, vorausgesetzt dass der Apparat vollkommen construiert ist. Da dies natürlich nie der Fall ist, musste dieser Condensator erst geaicht werden. Und zwar geschah dies nach der Methode, deren sich auch NERNST bedient. Es wird nämlich der oben (fig. 2) beschriebene Aichcondensator dem Messcondensator parallel geschaltet und die zur Wiederherstellung des Gleichgewichtes nöthige Verschiebung gemessen.

Ist dies geschehen, so wird der Aichcondensator wieder abgeschaltet und man stellt nun das Gleichgewicht durch Verschieben des anderen Messcondensators wieder her. Dann schaltet man wieder den Aichcondensator dem ersten Messcondensator parallel, misst

¹⁾ Siehe NERNST l. c.

wieder die nöthige Verschiebung und fährt in dieser Weise so lange fort, als die Glastafel reicht. So erhält man die verschiedenen Stellungen der Glastafel, denen gleiche Differenzen der Capacität entsprechen. Die Anwendbarkeit des eben geschilderten Aichungsverfahrens beruht auf der Voraussetzung, dass die Capacität der, der Induction nicht ausgesetzten, Theile des Aichcondensators, sowie des Drahtes, welcher letzteren dem Messcondensator parallel schaltet, verschwindet. Ersteres ist bei dem fig. 2 beschriebenen Condensator beinahe vollkommen erreicht. Ferner konnte auch die Anwendung eines Zuleitungsdrahtes auf folgende (dem Aufsatz von NERNST¹⁾ entlehnte) Weise vermieden werden. Der Aichcondensator wurde, durch eine Ebonitplatte isoliert, so aufgestellt, dass das 2 m.m. lange, aus dem Deckel des Condensators herausstehende Stück des Drahtes *D* (Fig. 2) an dem die innere Belegung befestigt ist in gleicher Höhe mit dem Zuleitungsdraht des Messcondensators stand. Das An- und Abschalten des Aichcondensators geschieht nun, indem man letzteren etwa 2 m.m. weit in horizontaler Richtung verschiebt, wodurch der Contact des Stückes *D* mit dem Zuleitungsdraht hergestellt, resp. unterbrochen wird. Die gegenseitige Lage von Zuleitungsdrähten, Condensatorenbelegungen etc. wird dadurch so wenig geändert, dass ein dadurch entstehender Fehler wohl kaum zu befürchten ist. Der ganze Zuleitungsdraht ist also jetzt auf das erwähnte Stück *D* reducirt; dasselbe ist wohl an und für sich von geringerer Capacität; der Fehler wird aber noch dadurch geringer, dass das Stück *D* der Induction seitens des Metalldeckels des Aichcondensators ausgesetzt ist, und daher auch als Theil der inneren Belegung desselben aufgefasst werden kann.

Das Resultat des oben beschriebenen Aichungsverfahrens sind die Zahlen welche in der zweiten Colonne der folgenden Tabelle I stehen.

¹⁾ l. c.

TABELLE I.

Capacität.	Stellung d. Glastafel.	Diff.
0	8.40	
1	15.05	6.65
2	21.45	6.40
3	27.65	6.20
4	33.60	5.95
5	39.70	6.10
6	45.90	6.20
7	52.25	6.35
8	58.83	6.58
9	65.53	6.70
10	72.31	6.78
11	78.72	6.41
12	84.88	6.16
13	90.47	5.59
14	95.72	5.25
15	100.68	4.96
16	105.22	4.54
17	109.39	4.17
18	113.52	4.13
19	117.14	3.62

Es sind dies Mittelwerthe aus 4 Beobachtungsreihen, deren grösste Abweichungen 0.2 m.m. betragen.

Diese Zahlen sind die Grundlage des folgenden Beobachtungsmateriales. Da es nur auf Differenzen ankommt, bezeichnen wir die Capacität des Messcondensators in der Stellung 8.40 mit 0, in der Stellung 15.05 mit 1 u. s. w.; d. h. wir nehmen die Capacität des Eichcondensators als Einheit. Die entsprechenden Zahlen finden sich in der ersten Colonne der obigen Tabelle.

Dazwischen liegende Werthe wurden durch graphische Interpolation gewonnen.

Als Controle für die Genauigkeit der in Tabelle I gegebenen Aichungsscala unternahm ich folgenden Versuch. Es wurde in genau derselben Weise, wie früher mit dem Aichecondensator, nunmehr mit einem anderen Condensator verfahren, dessen Zuleitungsdraht aber eine Länge von ca 12 cm. und also eine merkliche Capacität hatte. Bezeichnen wir die Capacität dieses Condensators mit e , die des Zuleitungsdrahtes mit d , die des Elektrometers sammt der übrigen, während des Versuchs unveränderten, Zuleitungsdrähte mit γ ; sind ferner $x_0, x_1, x_2 \dots$ die Capacitäten des Messcondensators, die den verschiedenen Stellungen der Glastafel entsprechen, welche man durch das obige Verfahren erhält, so ist die Bedingung, dass sich das Potential des Electrometerquadranten nicht ändert; dass also die Nadel im Gleichgewicht bleibt:

$$\frac{x_0}{\gamma} = \frac{x_1 + e}{\gamma + d}; \quad \frac{x_1}{\gamma} = \frac{x_2 + e}{\gamma + d}; \quad \dots \text{ u. s. w. } \quad (3)$$

daraus ergibt sich, sofort

$$\frac{\gamma + d}{\gamma} = \frac{x_2 - x_1}{x_1 - x_0} = \frac{x_3 - x_2}{x_2 - x_1} = \dots \text{ u. s. w.}$$

d. h. die aufeinanderfolgenden Verschiebungen der Glasplatte sind einander proportional.

Als Mittel aus drei, ebenso gut wie die früheren übereinstimmenden Beobachtungsreihen erhielt ich so die Zahlen die in der ersten Colonne von Tabelle II stehen.

Nach der früher definierten Skala entsprechen diesen Stellungen Capacitäten, die in der zweiten Colonne von Tabelle II stehn.

T A B E L L E II.

Stellung d. Glastafel.	Capa- cität.	Diff.	Capacität berechnet.	Δ
52 25	7.000		—	—
61.80	8.439	1.439	8.440	0.001
71.80	9.914	1.475	9.933	0.019
81.77	11.487	1.573	11.485	0.002
91.02	13.099	1.612	13.099	0.000
99.61	14.783	1.684	14.775	0.007
107.46	16.526	1.743	16.516	0.010
114.81	18.330	1.809	18.325	0.005

In der dritten Colonne stehen die Differenzen der Capacitäten. Die Zahlen sollten also einander proportional sein. Nimmt man aus den aufeinanderfolgenden Verhältnissen dieser Zahlen das geometrische Mittel und berechnet so Werthe, die einander thatsächlich proportional sind und mit den Zahlen der Colonne 3 möglichst übereinstimmen, so erhält man durch Addition dieser „berechneten Differenzen“ die in der vierten Colonne befindlichen Zahlen. Die Differenz zwischen diesen Zahlen und den Zahlen der zweiten Colonne findet sich in der fünften Colonne. Wir können diese Zahlen füglich als Beobachtungsfehler bezeichnen; wie man sieht ist der Grösste von ihnen 0.019 (der Capacität des Aichcondensators = 0.13 m.m. Verschiebung der Glastafel am Messcondensator). Wir können dies wohl auch als die untere Grenze der Genauigkeit annehmen, mit der der Werth einer einzelnen Capacität bestimmbar ist.

Auf dieselbe Weise wurden Tabelle III und IV gewonnen, von denen die erste sich auf den Theil der Glastafel bezieht, der in Tabelle II nicht vorkommt, während Tabelle IV das Resultat einer Versuchsreihe darstellt, bei der das frühere Verfahren mit einer bedeutend grösseren Capacität vorgenommen wurde.

Wie man sieht, zeigen diese Tabellen „Beobachtungsfehler“ von derselben Grösse an wie Tabelle II. Das früher über die Genauigkeit einer Einstellung gesagte, behält dennoch seine Gültigkeit.

Ueber die Grössenordnung dieser Fehler lässt sich Folgendes bemerken. Die Genauigkeit einer einzelnen Einstellung betrug im Minimum 0.1 mm. Verschiebung der Glastafel, wie zahlreiche Versuche lehrten, bei denen die Einstellung eines der beiden Messcondensatoren *ceteris paribus* wiederholt wurde. Jede der Zahlen, die

T A B E L L E III.

Stellung d. Glastafel.	Capa- cität.	Dif.	Capacität berechnet.	Δ
52.25	7.000		—	—
43.15	5.555	1.445	5.545	0.010
34.55	4.160	1.395	4.164	0.004
26.70	2.850	1.310	2.854	0.004
18.90	1.595	1.255	1.611	0.016
11.25	0.425	1.170	0.431	0.006

TABELLE IV.

Stellung d. Glastafel.	Capa- cität.	Diff.	Capacität berechnet.	Δ
27.15	2.920	4.080	—	—
52.25	7.000	4.220	6.983	0.012
80.10	11.220	4.445	11.233	0.013
103.70	15.661		15.663	0.002

in den vorhergehenden 4 Tabellen angegeben sind, ist das Resultat von drei Einstellungen (2 Einstellungen des eigentlichen Messcondensators und eine des anderen). Den Zahlen, welche sich in der 2^{ten} Colonne der Tabellen II, III, IV befinden, haftet eine grössere Ungenauigkeit an, da sich dem Fehler der Einstellung noch der gleichartige eventuelle Fehler der Aichungsskala beigesellt. Da aber alle Zahlen Mittelwerthe aus 4 Beobachtungen sind, so reduziert sich der zu erwartende Fehler auf 0.12 mm. Es ist dies also im Einklang mit dem früher Angegebenen. Der grösste Fehler, der in den Tabellen II bis IV vorkam, war gleich 0.13 mm., während die meisten bedeutend kleiner sind.

Die eben angestellte Betrachtung ist nicht streng richtig, da ja die Berechnung einer Capacität nach der Aichungsskala die Benützung von mehr als einer Beobachtung nöthig macht und ferner auch die Grössen „Capacität berechnet“ aus allen beobachteten abgeleitet sind. Dadurch kann aber der zu erwartende Fehler nur noch grösser als 0.12 mm. werden; und das, worauf es mir hier ankam, bleibt bestehen, dass nämlich der grösste Fehler von 0.019 Capacität des Aichcondensators = 0.13 mm. Verschiebung der Glastafel aus den Einstellungsfehlern erklärlich ist und also die prinzipielle Richtigkeit der Versuche durch diese Resultate nicht in Frage gezogen wird.

5. Messungen.

Die eigentlichen Messungen wurden nun folgendermassen ausgeführt. Der Messcondensator N_1 wurde auf 21.45 gestellt, der Schlüssel bei T (Figur 3) geöffnet. Das Gleichgewicht wird durch Anschalten von Hilfs capacities und durch Verschieben von N_2 hergestellt. Nun wird der Schlüssel T geschlossen und die Glastafel von N_1 so weit verschoben, bis wieder Gleichgewicht herrscht.

Wir nennen nun wieder x_0 und x_1 die Capacitäten von N_1 bei der ersten, resp. zweiten Stellung der Glastafel; γ die Capacität des Elektrometers und der Zuleitungsdrähte incl. des Drahtes, der von H zum Schlüssel T geht. Die Capacität des Drahtes, der von T zum Experimentiercondensator führt, sei d , die des Experimentiercondensators mit Vacuum als Zwischenmedium endlich sei gleich c . Dann ist ebenso wie früher Gl. (3):

$$\frac{x_0}{\gamma} = \frac{x_1 + c}{\gamma + d}$$

oder

$$x_0 - x_1 = c = x_0 \frac{d}{\gamma} \quad (4)$$

Wird nun der Experimentiercondensator mit einer dielektrischen Flüssigkeit gefüllt, so wächst seine Capacität etwa auf c' , und es wird eine grössere Verschiebung der Glastafel nöthig um ihn zu compensieren. Sei die Capacität des Messcondensators in dieser dritten Stellung gleich x_2 , so hat man analog dem früheren

$$x_0 - x_2 = c' - x_0 \frac{d}{\gamma} \quad (5)$$

Die Differenzen $x_0 - x_1$; $x_0 - x_2$ etc. werden direct abgelesen. Also lässt sich auch die Differenz $c' - c$ aus (4) und (5) in direct messbaren Grössen ausdrücken. Würde man dann noch den Werth von c kennen, so würde dies auch zur Bestimmung von c'/c genügen. Nun kann man durch Messungen, bei denen die Grösse γ absichtlich variiert wird, den Werth von c berechnen. Doch zeigt es sich, dass die dabei inbetracht kommenden Differenzen so gering sind, dass der Werth c nicht genauer als auf 10 pCt. angegeben werden kann, also unbrauchbar wird. Es bedarf also einer Bestimmung der Grösse $x_0 \frac{d}{\gamma}$ welche ein für alle Male gemacht werden kann. Es wurde nämlich der Zuleitungsdraht des Experimentiercondensators knapp an letzterem abgeschnitten und dann mittels eines Wachstropfens in möglichst gleicher Lage wie früher, aber von den Condensatorplatten isoliert, befestigt. (Dadurch, dass man den Draht wieder los macht und von neuem befestigt, kann man sich überzeugen, dass der dabei entstehende Fehler 0.2 mm. nicht übersteigt; übrigens tritt derselbe im Zähler und Nenner der Dielektricitätsconstante gleich auf). So kann man dann die dem Draht zukommende

Capacität bestimmen. Verfährt man nämlich mit dem Zuleitungsdraht allein ebenso, wie früher mit dem ganzen Condensator, so gelangt man zu einer Gleichung

$$\frac{x_0}{\gamma} = \frac{x'_0}{\gamma + d}$$

worin x'_0 die Capacität des Messcondensators nach der letzten Verschiebung bedeutet. Daraus entnimmt man sofort

$$x'_0 - x_0 = x_0 \frac{d}{\gamma} \dots \dots \dots (6)$$

Aus (4), (5) und (6) erhält man dann sofort für die Dielektricitätsconstante

$$\frac{c'}{c} = \frac{(x_0 - x_2) + (x'_0 - x_0)}{(x_0 - x_1) + (x'_0 - x_0)} = K \dots \dots \dots (7)$$

Bei der nun folgenden Angabe der Resultate meiner Messungen bedeutet y_1 die Stellung der Glastafel des Messcondensators nach Anschalten des Experimentiercondensators mit Vacuum als Zwischenmedium, der sich jedoch schon auf der Temperatur des flüssigen Gases befindet: y_2 die Stellung der Glastafel nach Anschalten des mit flüssigen Gas gefüllten Condensators. Mit x_1 und x_2 bezeichnen wir wie früher die diesen Stellungen entsprechenden Capacitäten (vor dem Anschalten stand die Glastafel stets auf 21.45 also $x_0 = 2.000$).

1 *Stickoxydul.*

19 Juni:

$y_1 = \dots \dots \dots$ (Diese Beobachtung wurde versäumt)

$y_2 = 106.2; 106.5; 106.2.$

20 Juni:

$y_1 = 58.85; 58.85; 58.90.$

$y_2 = 107.90; 108.10; 107.95.$

Diese Bestimmungen verdienen jedoch kein Vertrauen, da wie sich nachträglich herausstellte, das Stickoxydul stark verunreinigt worden war.

Definitiv sind die folgenden Werthe:

9 Juli:

$y_1 = 56.30, 56.40; 56.35$ Mittel 56.32

$y_2 = 106.00; 105.90; 106.00; 106.20$ 106.03 (± 0.17).

Die entsprechenden Capacitäten sind:

$$(x_0 = 2.000).$$

$$x_1 = 7.640.$$

$$x_2 = 16.191.$$

2. Sauerstoff.

10 Juli:

$$y_1 = 57.70; 57.70; 57.75 \quad \text{Mittel } 57.72$$

$$y_2 = 86.15; 86.10; 86.05; 85.85; 85.95 \quad 86.02 (\pm 0.17)$$

Die entsprechenden Capacitäten sind:

$$(x_0 = 2.000)$$

$$x_1 = 7.843$$

$$x_2 = 12.200$$

Die früher definierte Differenz $x_0^1 - x_0$ ergab sich:

$$x_0^1 - x_0 = 3.731.$$

(Da sich die Glastafel von 21.45 nur bis 8.40 verschieben lässt, musste zu dieser Bestimmung ein Hilfscapacitor verwendet werden; es verlohnt sich jedoch wohl kaum, die diesbezüglichen Daten in extenso mitzutheilen).

Demnach erhalten wir als Werth für die Dielektricitäts-constante nach Formel (7):

$$\left. \begin{aligned} K_{N_2O} &= \frac{14.191 + 3.731}{5.640 + 3.731} = 1.912 \\ K_{O_2} &= \frac{10.200 + 3.731}{5.843 + 3.731} = 1.455 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

An diesen Zahlen können wir noch eine Correction anbringen; wir berücksichtigen, dass nicht nur der Experimentiercapacitor, sondern auch der Zuleitungsdraht desselben bis zu einer gewissen Höhe vom flüssigen Gas umgeben war, während die Gesamtlänge des Drahtes 88 cm. betrug. Der Werth

$$x'_0 - x_0 = x_0 \frac{d}{\gamma} = 3.731$$

bezieht sich auf den Fall, dass der ganze Zuleitungsdraht von Luft umgeben ist. Falls es sich also um die Capacitätsbestimmung des mit Flüssigkeit gefüllten Condensators handelt, ist die Grösse d , also auch $(x'_0 - x_0)$ mit dem Factor

$$\left(\frac{83}{88} + K \cdot \frac{5}{88} \right)$$

zu multiplicieren, wo K die Dielektricitätsconstante des betreffenden Mediums bedeutet. Für diese Correction genügen die Näherungswerthe (8) wohl vollauf und ist der bei der erreichten Genauigkeit nicht in Betracht kommende Einfluss der Umhüllungsröhrchen vernachlässigt worden.

Wir erhalten so als endgiltige Werthe für Stickoxydul:

$$K_{N_2O} = \frac{14.197 + 3.731 \left(\frac{83}{88} + \frac{5}{88} \cdot 1.912 \right)}{5.640 + 3.731} = 1.933$$

für Sauerstoff:

$$K_{O_2} = \frac{10.200 + 3.731 \left(\frac{83}{88} + \frac{5}{88} \cdot 1.455 \right)}{5.843 + 3.731} = 1.465$$

Wie man sieht, sind die Zahlen y_2 ein wenig unsicherer als die, welche sich auf mit Luft gefüllte Condensatoren beziehen. Es mag dies von Temperaturschwankungen, oder auch von kleinen Verunreinigungen herrühren. Beachtet man dies und nimmt für die übrigen Zahlen die weiter oben gegebene Genauigkeit an, so resultiert als grösst möglicher Fehler (wenn wir annehmen, dass sich die Fehler aller Factoren addieren) für die Dielektricitätsconstante von Stickoxydul 0.5 %, für die von Sauerstoff 0.7 %, während der wahrscheinliche Fehler wohl noch geringer ist.

Der Werth 1.491, den DEWAR und FLEMING für die Dielektricitätsconstante des normal siedenden Sauerstoffes angegeben haben, weicht von meinem Werth um 1.8 % ab, welche Uebereinstimmung man wohl als ziemlich gut bezeichnen kann, wenn man bedenkt wie weit oft die Angaben verschiedener Beobachter über Dielektricitätsconstanten auseinandergehen, auch in Fällen, wo die betreffenden Substanzen wohl leichter zu erlangen sind, als verflüssigte Gase.

6. Anwendung der Resultate auf die CLAUDIUS-MOSOTTI'sche Formel.

Es liegt der Gedanke nahe, die Resultate dieser Arbeit zur Prüfung der CLAUDIUS-MOSOTTI'schen Formel zu verwenden.

Nach derselben ist bekanntlich:

$$\frac{K + 2}{K - 1} \cdot d = \text{Const.} = D$$

wo K wieder die Dielektricitätsconstante, d die Dichte bedeutet.

Mittels dieser Gleichung kann man also die Dielectricitätsconstante einer Substanz in flüssigem Zustand berechnen, wenn die Dielektricitätsconstante des gasförmigen Zustandes und die Dichte beider Aggregatzustände bekannt ist.

Bei Stickoxydul ist dies zur Zeit leider nicht genau möglich, da die Dichte desselben bei normalem Siedepunkt nicht genau bekannt ist. Setzen wir aber da es besonders interessant ist zu untersuchen, wie sich der hier gefundene Werth den Beobachtungen von LINDE anschliesst ¹⁾ die Dichte der Stickoxydul nach NATTERER ²⁾ 1.15 so kommt für die Constante D bei normal siedendem N_2O 4,85, während LINDE bei 0° für verflüssigtes Stickoxydul findet 5.42, und für gasförmiges nach KLEMENCIC bei der Dichte $1.969 \cdot 10^{-3}$ und K 1.001158, sich 5.103 ergibt.

Auch bei Sauerstoff ist nur eine angenäherte Prüfung dieser Formel möglich, da die diesbezüglichen Daten noch unsicher sind. So ist vor allem die Dielectricitätsconstante des gasförmigen Sauerstoffes nicht bekannt und es liegt nur eine allerdings gegründete Vermuthung von DEWAR und FLEMING ³⁾ vor, dass sich dieselbe von der Luft nicht viel unterscheiden könne, welche letztere von BOLTZMANN und KLEMENCIC übereinstimmend bei 0° und 760 mm. Druck zu 1.00059 bestimmt wurde.

Die Dichte des gasförmigen Sauerstoffes ist, ebenfalls bei 0° und 760 mm. Druck, gleich $1.4292 \cdot 10^{-3}$ ⁴⁾, die des siedenden Sauerstoffes ist nach OLSZEWSKI gleich 1.124 ⁵⁾ nach DEWAR ⁶⁾ 1.1375 nach LADENBURG und KRÜGEL ⁷⁾ 1.134.

Nehmen wir also als Dielectricitätsconstante des gasförmigen Sauerstoffes 1.00059, als Dichte des flüssigen Sauerstoffes 1.1375 an, so berechnet sich die Dielectricitätsconstante des flüssigen Sauerstoffes zu 1.556, welcher Werth der Grössenordnung nach, mit den Werthen von DEWAR und FLEMING und mir übereinstimmt.

Umgekehrt erhält man als Dielektricitätsconstante des gasförmigen Sauerstoffes aus der des flüssigen 1.00051 (statt 1.00059).

Bei der Unsicherheit der zur Berechnung nöthigen Daten, ist eine bessere Uebereinstimmung, als der Grössenordnung nach, nicht zu erwarten. Die Versuche widersprechen also der CLAUSIUS-MOSOTTISCHEN

¹⁾ l. c.

²⁾ Pogg. Ann. 62 pg. 134.

³⁾ l. c.

⁴⁾ LANDOLT und BÖRNSTEIN, pag. 116.

⁵⁾ Ztschr. f. phys. Chem. XVI, 383.

⁶⁾ Proc. Royal Instit. 96.

⁷⁾ Ztschr. f. Compr. Gase 99 pg. 77.

Formel nicht, während die endgiltige Entscheidung betreffs ihre Anwendbarkeit auf Sauerstoff vorderhand ungelöst bleiben muss.
