

104353 = 6

Ueber eine neue Methode
ZUR
**Messung der Dielectricitätsconstanten
von Flüssigkeiten.**

Eine, behufs Erlangung des Grades eines

Doctors der Physik

der Hochverordneten Physiko-mathematischen Facultät der Kaiserl. Universität Dorpat

vorgelegte Abhandlung

von

Magister Friedrich Heerwagen,

d. Z. Assistent am physikalischen Institut der Kaiser Wilhelms-Universität
zu Strassburg i. E.

Ordentliche Opponenten:

Cand. A. Jensen. — Prof. Dr. C. Schmidt. — Prof. Dr. Arth. v. Oettingen.



Dorpat.

Druck von C. Mattiesen.

1892.

104353
Universität
Dorpat

Einleitung.

Das hohe Interesse, welches man dem Studium der Dielectricitätsconstanten (D-C.) entgegenbrachte, und welches in der grossen Literatur über diese Materie zu Tage tritt, hat sich seither vornehmlich einem Punkte zugewandt. Es stand die wichtige Frage offen: Ist die von Maxwell¹⁾ aus der electromagnetischen Lichttheorie gefolgerte Beziehung $K=n^2$ richtig, ist in der That die D-C. K dem Quadrate des Brechungsquotienten n gleich?

Man kann nicht sagen, dass auf diese Frage eine unzweideutige Antwort erfolgt sei. Für viele Substanzen schien Maxwell's Beziehung sich zu bewähren, für eine grössere Zahl wohl stimmte sie nicht. Doch es war kein allzugrosses Gewicht auf Uebereinstimmung und Nichtübereinstimmung zu legen, denn offenbar fehlte es noch an einwurfsfreien Methoden zur Bestimmung von K . Hierauf liessen die grossen Unterschiede schliessen, welche oft zwischen den Zahlen verschiedener Beobachter vorhanden waren, auch zwischen den Zahlen desselben Beobachters, die nach verschiedenen Methoden gewonnen waren.

Eine wichtige experimentelle Stütze fand Maxwell

1) Treatise on Electricity and Magnetism, art. 788.

Gedruckt mit Genehmigung der physiko-mathematischen Facultät.
Dorpat, den 31 August 1892.

Nr. 114.

Prodecan: Dr. Arthur von Oettingen.

D112 967

well's Theorie in Boltzmann's¹⁾ Untersuchungen über die D-C. der Gase, deren Resultate später durch Klemencic²⁾ nach neuen Methoden bestätigt wurden. Die permanenten Gase zeigten eine schöne Uebereinstimmung mit Maxwell's Theorie. Hier aber trafen zwei Bedingungen zusammen, deren Fehlen bei anderen Körpern die unsicheren und die widersprechenden Resultate erklären konnte. Vor allem hatte man es bei den Gasen mit wirklichen Isolatoren zu thun, den einzigen vollkommenen Isolatoren vielleicht, die es überhaupt giebt. Dann aber besitzen die Gase bei kleinem Brechungsvermögen nur sehr geringe Dispersion, und mit hoher Sicherheit durfte hier der Brechungsquotient für unendlich lange Wellen aus den optischen Daten mit Cauchy's Formel berechnet werden.

Die Erfahrung hatte gezeigt, dass beim Experimentiren mit der gleichen Substanz oft verschiedene Zahlen für K gefunden wurden, wenn man die Zeit variirte, während deren Dauer die electricischen Kräfte wirkten. Je kürzer die Ladungsdauer, um so kleiner wird in der Regel K gefunden. Man glaubte an eine continuirliche Abnahme von K mit noch kleiner werdender Ladungsdauer bis zum theoretischen Werthe von n^2 hin. Es scheint die Ueberzeugung geherrscht zu haben, dass wirklich die D-C. gemessen worden seien; während doch, abgesehen von sonstigen Mängeln der Versuchsanordnungen und unerlaubten Vernachlässigungen, welche auf diesem Gebiete besonders schwer zu vermeiden sind, thatsächlich alle die errechneten Zahlen gefälscht sein konnten durch die Einflüsse der Electricitätsleitung im untersuchten

1) Wien. Ber. 69, S. 793. 1874.

2) Wien. Ber. 91, S. 712. 1885.

Dielectricum. Diese mussten K zu hoch erscheinen lassen, je länger die electricischen Kräfte wirkten.

Nur Schiller¹⁾ hatte, nach Methoden und mit Apparaten von Helmholtz²⁾ arbeitend, Zahlen für die D-C. einiger Körper geliefert, die frei von dem Einflusse der Leitung waren. Schiller arbeitete mit electricischen Schwingungen einer offenen Inductionsspirale, deren Enden zu den Belegungen eines Condensators geführt waren. Er beobachtete Schwingungsdauer ($1/20000 - 1/10000$ sec.) und Dämpfung der electricischen Oscillationen, und konnte hieraus die D-C. gesondert von der Leitung berechnen. Auch diese Methode gab für Spiegelglas K fast = 6, also mehr als doppelt so gross, wie n^2 .

Eine zweite Methode zur getrennten Bestimmung von D-C. und Leitvermögen gaben Cohn und Arons³⁾. Sie bewiesen endgültig, durch Messungen des zeitlichen Ladungsverlaufes von Flüssigkeitcondensatoren, dass Leitungsvermögen und Dielectricitätsconstante zwei von einander völlig unabhängige Eigenschaften der Körper sind, deren Wirkungen sich einfach superponiren. Sie zeigten in dieser und in einer folgenden Arbeit⁴⁾, dass geringe Verunreinigungen, welche das Leitungsvermögen verzehnfachen und mehr, die richtig definirt und gemessene D-C. kaum merklich änderten.

Durch die Arbeiten der erwähnten Autoren war die Zahl einwandfrei bestimmter D-C., welche der Maxwell'schen Beziehung nicht im entferntesten genügten, um zwei besonders auffallende Beispiele vermehrt worden.

1) Pogg. Ann. 152, S. 535. 1874.

2) Berl. Ber. 1871.

3) Wied. Ann. 28, S. 454. 1886.

4) Wied. Ann. 33, S. 13. 1888.

Die von Silow¹⁾ zuerst experimentell ausgeführte Methode der Kraftmessung hatten Cohn und Arous durch Anwendung von Wechselströmen an Stelle constanter Potentiale auf solche Flüssigkeiten anwendbar gemacht, welche schon immer zur Classe der Electrolyte gezählt wurden. Es ergab sich für Alkohol $K = 26.5$, für Wasser $K = 76$. Dies unerwartete Resultat konnte einerseits von Cohn²⁾ durch Messungen nach der Methode des Ladungsverlaufes bald bestätigt werden, andererseits fanden auch die späteren Beobachter³⁾ dasselbe.

Wieder konnte es scheinen, als ob doch vielleicht die hohen D-C. und damit die grossen Abweichungen von Maxwell's Gesetz durch das Vorhandensein electrischen Leitungsvermögens bedingt seien.

Hertz lenkte durch seine bahnbrechenden Untersuchungen von neuem die Aufmerksamkeit auf die Faraday-Maxwell'schen Anschauungsweisen, und indem er in Gebiete eindrang, welche bisher dem Experimente unzugänglich gewesen, konnte er electromagnetische Wellen erzeugen, die sich im Luftraume fortpflanzen, auch Reflexion und Brechung, sowie die Erscheinungen der Polarisation zeigten, gerade so wie Lichtstrahlen. Eine neue und sichere Stütze für die Identität des Lichtäthers

1) Pogg. Ann. 156, S. 389. 1875.

2) Wied. Ann. 38, S. 42. 1889.

3) Tereschin, Wied. Ann. 36, S. 792. 1889. — Rosa, Phil. Mag. 31, S. 188. 1891. — Winkelmann, Wied. Ann. 38, S. 161. 1889. Dass Hr. Щегляевъ (Sep.abdr. aus Ж. Физико-Химическаго Общ., Beibl. 15, S. 651. 1891.) nach einer mit der Winkelmann'schen identischen Methode für Alkohol und Wasser Zahlen erhält, die genau gleich dem Quadrate der Brechungsquotienten sind, kann dagegen wohl kaum in Betracht kommen.

mit dem Medium der electrisch-magnetischen Kräfte war hierdurch geschaffen.

Man versuchte bald, das neue Hilfsmittel der sehr schnellen electrischen Schwingungen, deren Wellenlänge in Laboratoriumsräumen messbar war, in verschiedener Weise zur Messung von D-C. zu verwerthen. J. J. Thomson¹⁾ fand für Glas $K = 2.7$, Lecher²⁾ dagegen 6.5 und 7.3, Blondlot³⁾ wieder 2.8. Diese Bestimmungen beruhen auf Capacitätsmessungen, und eine unbefangene Kritik wird denselben wenig Gewicht beilegen. Die Fehlerquellen mannigfacher Art sind zu bedeutend bei dieser Art Messungen.

Doch es konnte auf anderem Wege der scheinbare Widerspruch der experimentellen Ergebnisse mit Maxwell's Theorie gelöst werden. Arous und Rubens⁴⁾ verglichen die Geschwindigkeit, mit welcher electrische Wellen längs Drähten sich in Luft fortpflanzen, mit der Geschwindigkeit derselben Wellen in verschiedenen Dielectrics. Und sie fanden in der That den electrischen Brechungsquotienten gleich der Wurzel aus der D-C., letztere gemessen nach Schiller's Methode am gleichen Material. Diese Gleichheit bewährte sich auch für diejenigen Körper, für welche die optischen Brechungsquotienten ganz andere waren. Die Gleichheit des electrischen Brechungsquotienten mit \sqrt{K} wurde dann von Cohn⁵⁾ auch für Wasser nachgewiesen, und ist kürzlich

1) Proc. Roy. Soc. 46, S. 292. 1889. Beibl. 14, S. 53. 1890.

2) Wien. Ber. 99, Abth. IIa, S. 480. 1890. Wied. Ann. 42, S. 142. 1891.

3) C. R. 112, S. 1058. 1891. Beibl. 15, S. 575. 1891.

4) Wied. Ann. 42, S. 581 und 44, S. 206. 1891.

5) Berl. Ber. 50, S. 1037. 1891. Wied. Ann. 45, S. 370. 1892.

von Ellinger¹⁾ bestätigt worden durch Versuche, welche gar in völliger Analogie optischer Messungen mit einem Wasserprisma angestellt wurden.

Um die Maxwell'sche Beziehung zu prüfen, hatte man bis dahin stets den Brechungsquotienten für ∞ lange Wellen aus den optischen Daten mit Hilfe der Cauchy'schen Dispersionsformel $n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \dots$ berechnet, obschon es seit lange bekannt war, dass diese Formel keineswegs im Stande sei, die beobachteten Dispersionscurven richtig wiederzugeben. Dennoch wurde immer das nach Cauchy berechnete $n_\infty = A$ zum Vergleich mit \sqrt{K} herangezogen und meist suchte man die Abweichung von dem erwarteten Gesetz in der electrischen Grösse, statt in der optischen.²⁾ Durch Untersuchung von Dispersionscurven bis zu hohen ultrarothem Wellenlängen hin hat Rubens³⁾ jetzt den Nachweis erbracht, dass Cauchy's Formel bei solchen Substanzen den Gang der Brechungsquotienten richtig wiedergibt, für welche $A = \sqrt{K}$ gefunden worden ist; dass dagegen bei andern Körpern, wie bei verschiedenen Gläsern, Wasser, etc., zur Ermittlung der Grenzwerte n_∞ alle rationellen Anhaltspunkte fehlen.

Wenn somit die Frage nach der Berechtigung der Maxwell'schen Lichttheorie als zu Gunsten derselben entschieden angesehen werden kann, so muss nunmehr die genauere numerische Kenntniss der D-C. von anderem Gesichtspunkte aus Interesse gewinnen. Durch möglichste Variation der Methoden eine mehr qualitative Uebereinstimmung nachzuweisen, war bisher die Aufgabe. Jetzt

1) Wied. Ann. 46, S. 513. 1892.

2) Siehe z. B. Wüllner, Lehrbuch, Bd. 4, S. 1161. (1886.)

3) Wied. Ann. 45, S. 238. 1892.

ist unter Vermeidung oder Berücksichtigung aller Fehlerquellen ein einwandfreies Verfahren auszubilden, welches geeignet ist, bequem und sicher numerische Werthe der Constanten für verschiedene Stoffe zu liefern. Es ist zu erwarten, dass die stöchiometrischen Beziehungen, welche eine grosse Anzahl von Forschern¹⁾ aus dem Studium der Lichtbrechungsverhältnisse abzuleiten sich bemüht haben, klarer und deutlicher zu Tage treten werden, wenn man \sqrt{K} , resp. K der Rechnung zu Grunde legt, als wenn man mit Cauchy's Constante A , oder mit dem Brechungsquotienten eines beliebigen Lichtstrahles operirt. Denn eben das leistet die Messung der D-C., was bisher keine Formel vermochte: sie liefert uns den Grenzwert für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Aetherwellen in dem betreffenden Medium, befreit von den Einflüssen der Dispersion, welche ihrerseits besonders zu untersuchen wäre.

Zur weiteren Ausbildung geeignet ist nun zur Zeit am meisten die von Cohn und Arons²⁾ modificirte Methode von Silow, welche Werthe der D-C. liefert, die durch Leitung nicht entstellt sind, ohne dass die complicirten Apparate erforderlich wären, welche Schiller sowie C. u. A. in ihrer ersten Arbeit zur Zeitmessung bedurften.³⁾ Diese Methode, welche nur auf Flüssigkeiten anwendbar ist, beruht auf dem von Helmholtz gegebenen Satze, dass die mechanischen Kräfte, welche zwei auf festen Potentialen und in gleicher Lage erhaltene Leiter auf einander ausüben, der D-C. des Mediums proportional sind, in welchem die Kraftlinien zwischen diesen

1) Vgl. Ostwald, Allgem. Chem. I, 2 Aufl. S. 402—460.

2) Wied. Ann. 33, S. 13. 1888.

3) Siehe d. Citate S. 5.

Leitern verlaufen. Cohn und Arons füllten mit der Flüssigkeit ein passend gebautes Quadrantelectrometer, in welchem Flügel, Hülle und ein Quadrantenpaar zur Erde abgeleitet waren, während das zweite Quadrantenpaar geladen wurde. Zur Ladung dienten die Wechselströme eines Inductionsapparates, und die Ausschläge des Flüssigkeitselectrometers wurden mit den Ausschlägen eines demselben parallel geschalteten gewöhnlichen Electrometers verglichen. Dieselbe Vergleichung wurde ausgeführt, wenn Luft statt der Flüssigkeit sich im ersten Electrometer befand. Das Verhältniss der beiden Ausschläge des Flüssigkeitselectrometers, reducirt auf gleiche Ausschläge des Luftpneumometers, ist gleich der gesuchten D-C. Hat man es mit Flüssigkeiten von sehr hoher D-C. zu thun, wie Alkohol, namentlich aber Wasser, so arbeitet man hierbei unter sehr ungünstigen Umständen, da das Verhältniss der Ausschläge beider Electrometer gar zu sehr von der Einheit abweicht. Tereschin¹⁾ benutzte daher zwei einander ähnliche Electrometer, und verglich alle untersuchten Flüssigkeiten mit Aethylalkohol, dessen D-C. mit möglichster Genauigkeit bestimmt wurde. Derselbe Autor ersetzte den Inductionsapparat durch eine Accumulatorenatterie in Verbindung mit einem rotirenden Commutator, und erzielte dadurch grössere Constanz in den Einstellungen der Electrometer. Doch blieb die Unbequemlichkeit bestehen, zwei Apparate gleichzeitig beobachten zu müssen.

Die Form, welche Rosa²⁾ bei einer Wiederholung der Versuche von Cohn und Arons seinem Electro-

1) Wied. Ann. 36, S. 792. 1889.

2) Phil. Mag. 31, S. 188. 1891.

meter gab, muss als entschiedener Rückschritt bezeichnet werden, ebenso die Ersetzung des Hilfselectrometers durch einen technischen Spannungsmesser für constanten Strom. Dieser musste vor den rotirenden Commutator geschaltet werden und konnte demnach die Schwankungen und Unregelmässigkeiten, welche durch den stets etwas variablen Contact der Schleiffedern veranlasst werden, gar nicht mitmachen.

Nullmethode unter Anwendung eines Differential-electrometers.

Das Verfahren, welches ich eingeschlagen habe, ist das folgende: An einem Draht hängen zwei Electrometernadeln in zwei übereinander angeordneten Electrometern. Nadel, Hülle und je ein Quadrantenpaar (q_l und Q_r in der schematischen Fig. 1) sind mit einander verbunden und mit dem Punkte A eines Stromkreises. Durch Abzweigung von den Punkten B und C desselben Stromkreises werden die Quadrantenpaare q_r und Q_l geladen. Diese Ladungen streben die Nadel in entgegengesetzten Richtungen zu drehen. Sind die Abzweigungen so angelegt, dass die Nadel in Ruhe bleibt, so ist das Empfindlichkeitsverhältniss der zwei Electrometer umgekehrt proportional dem Verhältniss der Quadrate der in ihnen wirksamen Potentialdifferenzen, also auch dem Quadrate des Widerstandsverhältnisses zwischen AC und AB . Dieses Verhältniss ermittelt man einmal, wenn in beiden Electrometern Luft (W_l/W_r), ein anderes Mal, wenn im unteren Electrometer die zu untersuchende Flüssigkeit sich befindet (W_L/W_F). Bei der letzteren Bestimmung sind natürlich Wechselströme anzuwenden, und es ist für

inductionsfreie Widerstände Sorge zu tragen. Dann ist die D-C. der Flüssigkeit

$$K = \left(\frac{W_L}{W_F} \cdot \frac{W_r}{W_l} \right)^2$$

Das Differentialelectrometer, welches von mir construirt und von Hrn. Mechaniker Bosc hieselbst ausgeführt wurde¹⁾, wird im Detail an anderem Orte beschrieben werden. Bei der Construction desselben habe ich vornehmlich die Untersuchung von Flüssigkeiten mit hoher D-C. und merklicher Leitung im Auge gehabt — Wasser, Alkohol, wässrige und alkoholische Lösungen. Fig. 2 zeigt den Aufbau des ganzen Instrumentes im Querschnitt; Fig. 3 giebt einen verticalen, Fig. 4 einen horizontalen Schnitt durch das untere, zur Aufnahme von Flüssigkeit bestimmte Electrometer. Durch die Messingplatte *P* sind, mit Hartgummi isolirt, die Träger der 4 Cylinderquadranten geführt. In der Mitte der Platte befindet sich eine Bohrung, welche den Draht *F* durchlässt, an welchem das Flügelpaar (Flächen je 18×16 mm) hängt. Letzteres ist möglichst leicht aus hartem Messingdraht und Blech angefertigt, und sitzt mittelst einer Hülse à friction auf dem Drahte *F*, der weiter oben in ähnlicher Weise die Nadel des Luftelectrometers trägt. Das metallene Gehäuse *M* wird von unten her an die Platte geschraubt, und schliesst den Raum ab. Die Mittelöffnung in *P* ist umgeben von einem weiteren Ringe *R*, ebenso sind durch Röhren um 10 mm überhöht noch zwei Oeffnungen *O*₁ und *O*₂, deren Lage in *P* in

1) Herrn Professor Dr. F. Kohlrausch bin ich für die Liberalität, mit welcher er mir stets die reichen Mittel des Strassburger Instituts zur Verfügung gestellt hat, zu grösstem Danke verpflichtet.

Fig. 4 angedeutet ist, und welche zum Einfüllen der Flüssigkeit dienen. Bei den Versuchen mit Wasser wurde dasselbe stets bis zum Niveau dieser Röhren aufgefüllt, und dieselben dann mit Glasplättchen bedeckt. Alle Theile, welche mit dem Wasser in Berührung kamen, waren hochpolirt und vernickelt. Die Vernickelung hat sich vorzüglich erhalten. Bei der gewählten Form des Electrometers wird einmal mit grosser Strenge der Bedingung Genüge geleistet, dass der ganze Raum durch das Dielectricum ausgefüllt sei, in welchem die Kraftlinien von der beweglichen zur festen Electrode verlaufen. Dann aber ist die nöthige Empfindlichkeit mit ziemlich hoher Widerstandscapacität vereinigt, was im Hinblick auf eine Erwärmung des untersuchten Electrolytes durch den Strom, sowie im Hinblick auf eine demnächst zu besprechende Correctionsgrösse von Wichtigkeit ist.

Das obere Electrometer war ähnlich gebaut, nur konnten dort die Cylinderquadranten enger gemacht werden, auch wurde der bewegliche Flügel länger gewählt, und ihm ein etwas grösserer Abstand von der Axe ertheilt. Dadurch wurde die Empfindlichkeit des Luftelectrometers nahe viermal so gross wie die des Flüssigkeitselectrometers. Die Tragplatte *P* des unteren Electrometers wurde mittelst dreier Säulen von der Platte *P'* des oberen getragen. Auf dieser Platte erhebt sich eine weitere Säule, welche, mit Hartgummi isolirt, den Torsionskopf *T* trägt, an welchem der Aufhängedraht des beweglichen Systems befestigt ist. Als solcher diente ein Silberdraht von 0.047 mm Durchmesser und ca. 30 cm Länge. Ein Blechgehäuse war über die Suspensionsvorrichtung gestülpt, dasselbe hatte oben Durchlässe für einen Schlüssel zum Regieren des Torsionskopfes, sowie für die Zu-

leitungsdrähte zur Nadel und zu den Quadrantenpaaren des Luftelectrometers. Unten war ein mit Spiegelglas bedeckter Ausschnitt angebracht zur Beobachtung des an der Nadel befestigten Spiegels mit Fernrohr und Scala. Die Tragplatte des oberen Electrometers, an welcher alle anderen Theile des Instrumentes befestigt waren, war kreisrund gedreht, und ruhte auf den cylindrischen Fortsätzen dreier horizontaler Schrauben S (Fig. 2), welche an einem soliden eisernen Dreifusse sass. Letzterer war mit Fusschrauben zur Nivellirung versehen. Das ganze Electrometer war also von unten her zugänglich, und konnte leicht um seine eigene Axe gedreht werden. Das Instrument wurde auf dem grossen Stein einer Abdampfcapelle fest aufgestellt, Beobachtungsfernrohr und Scala standen in 250 cm Abstand gleichfalls auf einem vom Fussboden isolirten Stein. Spiegel und Flügel des Electrometers wurden auf ihrer Axe F (s. d. Figg.) so justirt, dass, wenn die Mitte der Scala im Fernrohr sichtbar war, die Flügel in beiden Electrometern symmetrisch in den Quadranten hingen. Am oberen Electrometer wurde dies durch die Gleichheit der verschiedenen gerichteten Ausschläge controlirt, welche eintraten, wenn man abwechselnd Q_r oder Q_l ableitet und das andere Quadrantenpaar ladet. Am unteren Electrometer wurde die Justirung mit der Schaltung der Fig. 1 ausgeführt. Ein geeigneter Commutator, welcher neben dem Beobachtungsfernrohr stand, und bei allen Versuchen benutzt wurde, regierte die Verbindungen bei D , E , G und H . Er gestattete, abwechselnd Q_r und q_l — oder Q_l und q_r — mit Hülle und Flügel zu verbinden, Q_l und q_r — oder Q_r und q_l — zu B und C zu führen. Der Flügel des Flüssigkeitselectrometers wurde nun auf dem Drahte F so ge-

dreht, dass, bei nahe richtigem Abzweignungsverhältniss W_l/W_r , die übrigbleibenden kleinen Ausschläge der Nadel entgegengesetzt gleich waren beim Umlegen des Commutators. Die Stellung des Electrometers mit den Quadranten, für welche diese Justirung ausgeführt war, konnte wiedergefunden werden, und wurde durch einen Anschlag gesichert, welcher an die Tragplatte P' geschraubt war. Dieser Anschlag legte sich stets in gleicher Weise gegen den eisernen Dreifuss. Letztere Stellung liess sich überdies leicht controliren durch das Spiegelbild der Scala an der Verschlussplatte des Gehäuses vor dem Spiegel. Die richtige Lage der Nadel war durch die Ablesung 500 (Mitte der Scala) gegeben.

**Bestimmung des Empfindlichkeitsverhältnisses,
wenn nur Luft im Electrometer sich befindet.**
(Luftempfindlichkeit).

Es hätte keinen Zweck gehabt, den Nullpunct der Nadel vor jeder Beobachtung genau auf 500 einzustellen, da kleine Abweichungen von dieser Normalstellung jedenfalls das Empfindlichkeitsverhältniss nur unbedeutend beeinflussen konnten. Als äusserste Grenzen hielt ich 460 und 540 ein (Scalenabstand 2500 mm), doch wurde nur selten bei mehr als 20 mm Abweichung von der Mitte beobachtet.

Zur Bestimmung der Luftempfindlichkeit benutzte ich eine Batterie von 20 kleinen Chromsäureelementen, welche durch einen grossen Stöpselrheostaten geschlossen wurden. W_l war hierbei stets gleich 4000 $S.E.$, der correspondirende Werth von W_r wurde interpolirt meist aus Beobachtungen bei $W_r = 7800$ und 7900 . Nullpunct und Einstellungen des Electrometers, welches hierbei fast völ-

lig ungedämpft schwang, wurden stets aus Schwingungsbeobachtungen abgeleitet, und zwar wurden jedesmal drei Umkehrpunkte aufgeschrieben. Die Beobachtungen wurden zuerst mit positiven Potentialen (Strom von *C* nach *A*, Fig. 1), dann in umgekehrter Reihenfolge mit negativen (Strom von *A* nach *C*), angestellt. Ich gebe ein Beispiel für das Schema dieser Beobachtungen. Die Zeichen \searrow und \swarrow bedeuten die beiden Stellungen des Commutators *D—H*, welcher die verschiedenen Quadrantenpaare mit Nadel und Gehäuse verbindet oder zur Ladung bringt.

Tabelle I.

Luftempfindlichkeit. 6. VI. 92. 11h 7^m — 11h 17^m a. m.

$$W_l = 4000$$

Nullpunkt	$W_f' = 7800$				$W_f'' = 7900$					
	\searrow	\swarrow	\swarrow	\searrow	\swarrow	\searrow	\searrow	\swarrow		
Umkehrpunkte	489.9 490.2	494.0	486.5 486.9	488.7	498.4 497.8	492.8	487.2 488.0	494.4	495.4 494.8	489.2
Umkehrpunkte	495.0 494.5	489.2	485.0 485.6	491.6	497.1 496.7	492.1	487.9 488.2	492.3	490.6 491.0	494.7
Ruhelage: 492.0	92.4	91.6	86.00	90.15	97.50	92.45	87.83	93.35	92.95	91.95

$$\searrow - \swarrow = -6.90 \quad +1.86$$

$$6.90 \times 100 = 78.76$$

8.76

$$-1.88 = C_r$$

7800

$$W_f = 7876.9$$

Die Widerstände des Rheostaten, welche bei meinen Versuchen zur Verwendung kamen, hatte ich sorgfältig mit einander verglichen und auf das Stück 4000 zurückgeführt. Die kleinen Fehler des Rheostaten liefern im

wesentlichen die Correction C_r . Ein ganz unbedeutender Antheil der Correction rührt noch daher, dass streng genommen die lineare Interpolation nicht zwischen den Widerständen 7800 und 7900 vorgenommen werden soll, sondern zwischen den Kräften, welche auf den oberen Electrometerflügel wirken, denn auf den unteren wirkt stets die volle Klemmspannung der 20 Elemente. Diese Kräfte sind proportional $(W_l/W_f')^2$ und $(W_l/W_f'')^2$. Aufeinander folgende Bestimmungen von W_f zeigten stets eine sehr hohe Uebereinstimmung untereinander. In längeren Zeiträumen traten Schwankungen auf, vor und nach einer Beobachtungsreihe mit Wasser wurden manchmal etwas abweichende Zahlen gefunden — doch blieben diese Differenzen auf einige Zehntausendstel des ganzen Betrages beschränkt. In Betracht ziehen musste man aber, dass das Empfindlichkeitsverhältniss sich noch merklich mit der Nullstellung der Nadel änderte. Zur Illustration des Gesagten sind in der nachfolgenden Tabelle diejenigen Messungsergebnisse, welche an meine hauptsächlichsten zwei Beobachtungsreihen mit Wasser sich anschliessen, wiedergegeben.

Tabelle II.

Nullp.	W_f	$W_{500} = W_f + 0.16(500 - Np)$	Datum u. Bemerkungen.
492.0	7876.9	7878.2	6. VI. 1892.
517.0	81.2	78.5	
515.3	79.2	76.7	
512.3	76.3	74.3	7875.9
465.2	68.0	73.6	
468.4	70.7	75.7	22. VI.
515.1	78.1	75.7	
516.7	78.0	75.3	
486.4	72.5	74.7	7875.0
521.5	77.4	74.0	
			25. VI.
			" "

Ein wenig wanderte der Nullpunct stets, in Folge der elastischen Nachwirkung im Aufhängedraht. Die grösseren Aenderungen sind absichtlich durch Drehen des Torsionskopfes hervorgerufen.

Bestimmung des Empfindlichkeitsverhältnisses für Füllung des unteren Electrometers mit Flüssigkeit.

Die mitzutheilenden Versuche beschränken sich zunächst nur auf die Untersuchung destillirten Wassers; an der Hand dieses Beispiels soll das Verfahren auseinandergesetzt werden.

Correctionen.

Bei der Untersuchung leitender Flüssigkeiten im Electrometer tritt eine wichtige Correction auf: Ist der Widerstand der Flüssigkeit im Electrometer noch vergleichbar mit dem Widerstande W_F des Hauptstromkreises, welcher die Potentiale liefert, sowie mit dem Widerstande der Zuleitungsdrähte zum Electrometer, so hat man den hieraus entstehenden Potentialverlust in Rechnung zu setzen.

Bei genaueren Messungen, welche überdies bis zu höheren Leitfähigkeiten ausgedehnt werden sollen, kann es nicht mehr gestattet sein, den Aufhängedraht des Electrometerflügels direct mit der Hülle und dem einen Quadrantenpaare zu verbinden. Der dünne Draht hat einen merklichen Widerstand (22 *S. E.* bei Cohn und Arons, bei mir 3.2 Ω), und da ein Strom denselben durchlaufen muss, befindet sich schliesslich die Electrometernadel nicht mehr auf genau dem gleichen Potential wie Hülle und ein Quadrantenpaar — ein Umstand, auf

welchen meines Wissens bisher noch von keiner Seite aufmerksam gemacht worden ist. Ich führte daher besondere Leitungen w_f , w_q und w_h (Fig. 1) zu dem schon mehrfach erwähnten Commutator. Die Widerstände der Leitungen w_h und w_q , welche aus ganz dünnem und aus etwas stärkerem Kupferdraht zusammengesetzt wurden, glied ich bis auf Bruchtheile eines Procents so ab, dass die Leitungsfähigkeiten $1/w_f \dots 1/w_h \dots 1/w_q$ proportional der Anzahl von Stromfäden waren, welche im Electrometer, von einem Quadrantenpaare ausgehend, zum Flügel . . . zur Hülle . . . zum anderen Quadrantenpaare hinübergangen. Dadurch wird die von der Theorie des Experimentes vorausgesetzte Gleichheit der letzteren 3 Potentiale nun auch wirklich mit möglichster Schärfe erreicht.

Man hat es bei dem Electrometer mit einem System von 4 Electroden zu thun: Flügel, Hülle und zwei Quadrantenpaare. Die Hülle schliesst die anderen drei Electroden fast völlig ein, und der Raum ist mit homogener Flüssigkeit gefüllt. Dann ist die Anzahl der Stromfäden, welche von den 4 Electroden mit den Potentialen $v_1 \dots v_4$ ausgehen, eine lineare homogene Function der 4 Potentiale, und zwar

$$\begin{aligned} i_1 &= l_1 v_1 - l_{12} v_2 - l_{13} v_3 - l_{14} v_4 \\ i_2 &= -l_{12} v_1 + l_2 v_2 - l_{23} v_3 - l_{24} v_4 \\ i_3 &= -l_{13} v_1 - l_{23} v_2 + l_3 v_3 - l_{34} v_4 \\ i_4 &= -l_{14} v_1 - l_{24} v_2 - l_{34} v_3 + l_4 v_4 \end{aligned}$$

und, weil keine Stromfäden aus dem System heraustreten,

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0.$$

Die Grössen l sind Constanten, welche von Form und Lage der Electroden abhängen, und noch als gemeinsamen Factor das specif. Leitungsvermögen der Flüssig-

keit enthalten. Geht ein Strom von 1 zu den unter einander verbundenen Electroden 2, 3, 4, so ist $v_1 = v$ und $v_2 = v_3 = v_4 = 0$ zu setzen, also

$$\begin{aligned} i_1 &= l_1 v & i_2 &= -l_{12} v \\ & & i_3 &= -l_{13} v \\ & & i_4 &= -l_{14} v \end{aligned}$$

Folglich giebt die Widerstandsbestimmung direct

$$l_1 = l_{12} + l_{13} + l_{14} = 1/w_1$$

Ebenso erhält man für die anderen Gruppierungen der Electroden: 2|1,3,4; 3|1,2,4; 4|1,2,3; 1,2|3,4; 1,3|2,4 und 1,4|2,3 je eine Gleichung, aus welchen leicht die uns interessirenden Strombruchtheile l_{qf}/l_q ; l_{qh}/l_q ; l_{qg}/l_q berechnet werden können.

Die Untersuchung der Stromvertheilung im Electrometer wurde einmal an dem fertig montirten Instrument vorgenommen, wobei als Füllung Wasser mit einer Leitfähigkeit von ca 10×10^{-10} ($Hg = 1$) diente. Dann wurde das untere Electrometer abgeschraubt, der Flügel an einem besonderen Hilfsdraht befestigt, und von einem Stativchen in seiner richtigen mittleren Lage festgehalten. Zu den Widerstandsmessungen diente eine Walzenbrücke nach F. Kohlrausch mit Inductionsapparat und Telephon. Die Einstellungen waren sehr sicher und konnten so rasch gemacht werden, dass auch bei der ersten Beobachtungsweise die Messung schon beendet war, ehe die Nadel noch merklich aus ihrer Ruhelage sich fortbewegt hatte. Beide Beobachtungsreihen lieferten übereinstimmende Werthe, welche auch durch spätere Controlversuche noch bestätigt wurden. Die gefundenen Strombruchtheile und die abgeglichenen Widerstände der Zuleitungen vom Commutator zum Electrometer betragen:

Quad.-Flügel	0.235; $w_f = 3.34 \Omega$;	Product = 785
Quad.-Hülle	0.463; $w_h = 1.69$ „;	.. = 782
Quad.-Quad.	0.303; $w_q = 2.60$ „;	.. = 788

Die Producte der zusammengehörigen Grössen in der letzten Colonne zeigen die erforderliche Gleichheit.

Die wirksamen Potentialdifferenzen in beiden Electrometern verhalten sich in erster Annäherung wie $W_L : W_F$. Wird die durch den endlichen Widerstand im Electrometer verursachte Correction mit C_E bezeichnet, so hat man genauer zu setzen (s. Fig. 1)

$$\frac{W_L + C_E}{W_F} = \frac{J(W_L - W_F) + (J - i)W_F - i \left(w_c + \frac{1}{\frac{1}{w_f} + \frac{1}{w_h} + \frac{1}{w_g}} \right)}{(J - i)W_F - i \left(w_c + \frac{1}{\frac{1}{w_f} + \frac{1}{w_h} + \frac{1}{w_g}} + w_q + w_a \right)}$$

Bei allen späteren Versuchen wurde der Widerstand der Flüssigkeit zwischen den Punkten D und E gemessen. Eine einfache Umschaltvorrichtung hob die Verbindungen mit w_c und w_a auf, und stellte solche her mit der zur Widerstandsmessung dienenden Walzenbrücke, welche neben dem Commutator stand. Ist W_E der gemessene Widerstand, so ist

$$\frac{i}{J} = \frac{W_F}{W_E + W_F + w_c + w_a}$$

w_c und w_a verschwinden neben W_E völlig, und nach einfachen Umformungen und Entwicklungen, sowie nach Einführung der numerischen Werthe der Zuleitungswiderstände findet man die Correction für W_L :

$$C_E = \frac{(3.42 + W_F)W_L - (0.81 + W_F)W_F}{W_F + W_E}$$

Weitere Glieder, die bei der Entwicklung zunächst mitgenommen wurden, kommen bei den bisherigen Versuchen nicht in Betracht. Bei den Messungen am Wasser war stets $W = 4.5$, W_L zwischen 20 und 21 Ω . Der Widerstand W_E lag zwischen 7500 und 2500 Ω und die Correction betrug demnach 0.018 bis 0.056 Ω , also 0.1 bis 0.3 % von W_L .

Gelegentlich der Untersuchung der Stromvertheilung wurde auch die Widerstandscapacität F des Electrometers bestimmt durch Vergleichung mit einem wohlbekanntem Widerstandsgefässe. Es ergab sich $F = 9900 \times 10^{-10}$. Dabei sind die Leitfähigkeiten auf Hg bezogen, die Widerstände jedoch in Ω gemessen. Die Widerstandsmessungen, welche später bei den Bestimmungen der D-C. für die Berechnung der Correction C_E stets erforderlich waren, lieferten also zugleich auch das auf Quecksilber bezogene Leitvermögen

$$\lambda = \frac{9900}{W_E} = 3 \cdot 10^{-10}$$

Hilfsapparate.

Die Messung der D-C. ist bei dieser Methode zurückgeführt auf die Messung zweier Widerstandsverhältnisse (vgl. oben S. 11). Bei Bestimmung der Luftempfindlichkeit konnte hierzu ein gegebener Rheostat benutzt werden, anders liegt es bei den Messungen an leitenden Flüssigkeiten. Um die Correction C_E nicht über einen mässigen Betrag hinausgehen zu lassen, ist es erforderlich, dass die Widerstände, von welchen abgezweigt wird, nicht zu gross seien. Dann muss man aber relativ starke Ströme hindurch schicken, um die nöthigen Potentiale

an den Enden zu erhalten. Ich stellte für meine Versuche einen besonderen Rheostaten her aus Mangandraht von 1.0 mm Durchmesser. Derselbe enthielt hinter einander folgende Stücke: 0.5 Ω , dann 21 Ohmstücke und 11 Stücke von 0.1 Ω . Die Verbindungen von den Einern nach den Zehnteln konnten nach Belieben so eingerichtet werden, dass 21, 20, 19 ... ganze Ohm im Stromkreise sich befanden. Ein grosses Intervall von Widerstandsverhältnissen kann bei dieser Anordnung mit Leichtigkeit beherrscht werden.

Die Widerstände waren in bifilare Spiralen gewickelt, und hingen mit ihren starken kupfernen Zuleitungen in kleinen Quecksilbernapfchen, die in einen mit Paraffin ausgekochten Holzrahmen gebohrt waren. Das Ganze stand in einem viereckigen Glaskasten, welcher mit Petroleum angefüllt wurde, um auch bei stärkeren Strömen jede störende ungleiche Erwärmung der Widerstände zu vermeiden. Der Rheostat wurde hergestellt im November 1891, und im April 1892 nochmals nachjustirt. Keines der herstellbaren Widerstandsverhältnisse wich um mehr als $\frac{1}{100,000}$ von seinem Nominalwerth ab, der Rheostat war also noch über die Grenzen der geforderten Genauigkeit hinaus als correct zu betrachten. Bei den bisherigen Versuchen wurde die Abzweigungsstelle A (Fig. 1) stets an den Anfang der Widerstandsreihe gelegt, und W_E immer = 4.5 genommen. Der Punct C wird natürlich immer in die Reihe der Zehntel gelegt und es sind 11 Zehntel vorhanden, um immer bequeme Interpolationsgrenzen zu haben, ohne bei zusammengehörigen Versuchen den ganzen eingeschalteten Widerstand — und damit auch die Potentialdifferenz AB — um eine Einheit ändern zu müssen.

Durch den Rheostat wurde ein Wechselstrom geleitet, der anfangs von einer constanten Batterie in Verbindung mit einem rotirenden Commutator geliefert wurde. Der Commutator bestand aus 2 isolirt verschraubten Halbcylindern von Messing, welchen seitliche Schleifringe den Strom zuführten. Diametral gegenüberstehende Bürsten aus je 8 federnden Cu-Drähten nahmen den Wechselstrom ab. Getrieben wurde der Commutator von einem Wassermotor. Bei gleichförmiger Rotation muss diese Vorrichtung völlig gleiche Strommengen in + und — Richtung liefern, unbeschadet geringer Excentricitäten in der Trennungslinie der Halbcylinder und der Verbindungslinie der 2 Bürstencontacte. Sitzt aber die Schnurscheibe excentrisch auf der Axe des Commutators, so ist die Winkelgeschwindigkeit nicht mehr in allen Momenten einer Umdrehung die gleiche, und es können sich Stromüberschüsse in einer Richtung herstellen. Gewisse störende Erscheinungen, welche anfangs bei meinen Versuchen auftraten, legten die Vermuthung nahe, dass bei der Genauigkeit meiner Messungen diese Art der Wechselstromerzeugung nicht mehr hinreichend sicher eine dauernde Polarisirung ausschliesse. Ich will hinzufügen, dass diese Vermuthung keinen weiteren Beweis gefunden hat, doch war es in jedem Falle ein methodischer Fortschritt, dass ich wieder zur Anwendung inducirter Ströme zurückkehrte. Ich baute einen Transformator aus \square -förmigen Eisenblechscheiben, mit Papier von einander isolirt, umwickelt mit 2×187 Windungen Kupferdraht von 1 mm Durchmesser (zus. 0.9 Ω) als secundärer, und 2×55 Windungen eines dicken Leitungskabels als primärer Wicklung. In letztere ging nun der Wechselstrom vom rotirenden Commutator, der Strom aus der secundären

Wicklung wurde in den Rheostaten geführt. Nun ist nicht nur das Electrometer stets metallisch geschlossen — das war es immer durch W_F — sondern auch der ganze Abzweigungsrheostat ist es, und ein einseitiger Ueberschuss der durchgehenden Electricitätsmengen ist nicht mehr denkbar. Ich hatte die weitere Bequemlichkeit, mit einem niederen primären Potential arbeiten zu können, also mit einer geringeren Anzahl von Elementen, da stärkerer Strom als früher denselben unbeschadet entnommen werden konnte. Bei meinen letzten Versuchen benutzte ich 4 oder 5 Accumulatoren. Der Commutator rotirte mit hoher Geschwindigkeit, meist 70—80 Touren in der Secunde. Die Unterbrechungsfunken ruinirten denselben stark und die Bürsten nutzten sich rasch ab. Die Folge davon war, dass bei fortgesetztem Arbeiten in tagelangen Beobachtungsreihen bei gleicher Elementenzahl im primären Kreise der secundäre Strom oft erheblich abnahm. Wenn erforderlich, verstärkte ich dann die primäre Batterie.

Zur Bestimmung der Tourenzahl des Commutators diente das Zählwerk eines kleinen Woltmann'schen Anemometers, welches in geeigneter Weise an den Wassermotor angeschlossen war. Mittelst eines Zügels konnte man vom Platze des Beobachters aus das Zählwerk nach der Uhr in Gang setzen und ausrücken. Um gleichförmigeren Gang von Motor und Commutator zu erzielen, setzte ich auf die Axe des ersteren einen Windflügel aus Blech, und drehte den Wasserhahn stets voll auf. Zur Variation der Tourenzahl war der Commutator mit 3 Schnurscheiben verschiedenen Durchmessers versehen.

Beobachtungen am Wasser.

Als erstes Object der Untersuchung sollte reines Wasser dienen, um die D-C. desselben, auch in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur, möglichst genau festzulegen. Man kann bequem das Flüssigkeitsgefäss des Electrometers von unten her mit einem Bade umgeben zur Erzielung niederer und höherer Temperaturen, doch beobachtete ich vorläufig nur bei den gerade vorhandenen, resp. durch Heizung, Thür- und Fensteröffnen, und dgl. erreichbaren Zimmertemperaturen. Die Kugel eines Geissler'schen Thermometers lag hart an der Wand des Flüssigkeitsgefässes, und das Ganze war mit einer doppelten Schicht sehr dicker Watte bekleidet. Das Thermometer war in $\frac{1}{5}^{\circ}$ getheilt, und in der Reichsanstalt an das Luftthermometer angeschlossen. Den Eispunkt bestimmte ich neuerdings, und fand ihn ungeändert. Da die Zimmertemperatur entweder fast völlig constant gehalten wurde, oder doch nur sehr langsam sich änderte, ist von Seite der Temperaturmessungen kein merklicher Fehler zu befürchten.

Das Wasser, mit welchem ich arbeitete, war in dem Destillirapparate des physikalischen Instituts nochmals destillirt. Bei meinen hauptsächlichsten Versuchsreihen hatte mein Material nur eine Leitfähigkeit von 1.3×10^{-10} . Das Wasser wurde in das Electrometer gefüllt mittelst einer gebogenen engen Glasröhre, welche durch die Oeffnung *O* (Fig. 4) eingeführt wurde, und bis auf den Boden des Gefässes reichte. Die Glasröhre war an einen Trichter angesetzt mit einem Stück Kautschuk-schlauch, der durch einen Quetschhahn verschlossen werden konnte. Röhre und Trichter standen stets mit destillirtem

Wasser gefüllt, letzterer zum Schutze gegen Staub mit einer Glasplatte bedeckt. Sollte das Electrometer gefüllt werden, so liess ich das Wasser auslaufen, spülte mit reinem Material aus meinem Vorrathe nach, führte das Rohr in das Electrometer ein, während Trichter und Rohr mit reinem Wasser ganz gefüllt waren. Dann konnte man durch Oeffnen des Quetschhahnes eine von Luftblasen völlig freie Füllung des Electrometers bewirken. Beim Ansteigen des Wasserniveaus im Innern wird der Flügel durch Capillarkräfte hin und her gezerrt, dies wirkt ungünstig auf den Aufhangedraht, und es können sich dabei leicht noch Luftblasen bilden, die nicht mehr glatt durch die Oeffnungen oben entweichen. Darauf deuteten Verlegungen des Nullpunkts hin, welche manchmal vorkamen, und ein Zurückführen der Nadel mittelst des Torsionskopfes nothwendig machten. Daher stellte ich eine einfache Vorrichtung her, mittelst deren der Flügel zwischen den beiden Electrometern gepackt, und in seiner axialen Stellung sicher arretirt werden konnte. Ebenso wie beim Füllen, so gewährt auch beim Entleeren des Electrometers die Anwendung dieser Arretirung dem Arbeiten grosse Sicherheit und Bequemlichkeit. Beim Entleeren wurde zunächst von der erwähnten Oeffnung *O* aus ein Theil des Wassers mit der Wasserluftpumpe abgesaugt, dann Watte und Thermometer entfernt, die Hülle des Flüssigkeitselectrometers abgeschraubt, und das Wasser fortgegossen, resp. nochmals in einem Widerstandsgefäss die Leitfähigkeit desselben gemessen. Die Tropfen, welche an Flügel, Quadranten, u. s. f. hängen blieben, wurden alle vorsichtig mit spitzen und geeignet gebogenen Glasröhrchen mittelst Wasserluftpumpe abgesaugt. Dank der vorzüglichen Vernickelung war auf diese

Weise in kürzester Zeit alles getrocknet. An den Ecken der Hartgummipfropfe, welche die Quadranten trugen, wurde noch etwas mit Fliesspapier nachgeholfen, nach einigen Stunden das Gefäss wieder angeschraubt, und alsbald zur Controle wieder die Luftempfindlichkeit bestimmt (s. S. 15).

Resultate.

Ich erhielt anfangs sehr unerwartete und schwer zu deutende Resultate. Nicht nur, dass ich auffallend hohe Zahlen für K , die D.C. des Wassers, fand — fast 5% höhere noch als Tereschin in einem Falle, es zeigte sich, dass jede Beobachtung einen kleineren Werth gab, als die vorhergehende. Und einige Zeit nach dem Eingiessen des Wassers gingen die Zahlen noch unter die Tereschin'schen hinab. Die Temperatur, welche ja nach den Beobachtungen von Rosa¹⁾ einen hohen Einfluss auf K hat, wurde constant gehalten; kleine Schwankungen von wenigen Zehntelgraden konnten überdies leicht mit genügender Sicherheit mittelst der Formel $d.(K+2)/(K-1) = D$ (s. weiter unten) in Rechnung gesetzt werden, deren Anwendbarkeit auf Rosa's Versuche Lebedew²⁾ nachgewiesen hat, und die dann auch Cohn³⁾ an seinen Messungen electrischer Wellen in Wasser innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Beobachtungen bestätigt fand.

Natürlich verschlechterte sich das Wasser nach dem Einbringen ins Electrometer, und die Leitfähigkeit stieg

1) Rosa, a. a. O.

2) Wied. Ann. 44, S. 288. 1891.

3) Berl. Ber. 50, S. 1037. 1891. und Wied. Ann 45, S. 370. 1892.

anfangs sehr rasch. Die scheinbare Abnahme von K zeigte sich immer noch in gleicher Weise, nachdem durch Herstellung des Transformators der Verdacht beseitigt war, dass möglicherweise Unvollkommenheiten des rotirenden Commutators störende Polarisationen zur Folge gehabt hätten. So lag der Gedanke unabweisbar nahe, dass man es in diesem Gebiete sehr reinen Wassers nun doch vielleicht mit einem directen Einfluss des Leitungsvermögens zu thun habe. Aber wiederholte Füllungen des Electrometers, an welchen bei gleicher Temperatur wie früher beobachtet wurde, gaben zwar qualitativ gleiche Resultate, doch waren dieselben weit entfernt, für gleiches λ auch gleiches K zu liefern. Erst spätere Beobachtungsreihen, bei denen ich das Wasser über Nacht im Electrometer liess, und am folgenden Tage weiter arbeitete, bahnten die Lösung an. So lange Zeit nach der Füllung nahm das Leitvermögen des Wassers nur noch langsam zu, aber auch $\partial K/\partial \lambda$ schien nur noch ganz klein. Später habe ich bei tagelang fortgesetzten Beobachtungsreihen völlige Constanz erhalten. Doch verschlechterte sich das Wasser dann auch nur noch äusserst langsam. Auch die anfänglichen Werthe nach dem Eingiessen waren bei späteren Beobachtungsreihen lange nicht mehr so viel höher, als die normalen, und in kürzerer Zeit waren die letzteren erreicht. Zugleich erhielt sich das Wasser viel besser rein. Ich vermuthe, dass letzteres daher rührt, dass ich in jener Zeit erst das Absaugen der Tröpfchen nach dem Entleeren des Electrometers zur Methode erhoben hatte, vorher stets mit Fliesspapier operirte. Offenbar sind früher wider Willen beim Trocknen die Electroden immer wieder verunreinigt worden. Auch hatten die Hartgummi-Electrodenträger inzwischen einen Ueberzug

von Schellack erhalten, und auch dies mag die Quellen der Verunreinigung des Wassers vermindert haben.

Für die so ausführlich besprochenen Störungen, welche immerhin in jeder Beobachtungsreihe einen her vorragend regelmässigen Verlauf zeigten, scheint mir nur eine Erklärung übrig zu bleiben, welche dieselben auf die einfachsten Ursachen zurückführt.

Das Wasser nimmt im Electrometer Substanzen auf in minimalen Mengen, die seine Leitfähigkeit erhöhen. Geschieht die Aufnahme rasch, was namentlich zu Anfang der Fall ist, so kann die Diffusion nicht schnell genug vor sich gehen, die Flüssigkeit ist nicht mehr homogen, besser leitende Schichten liegen an den Grenzen der Flüssigkeit. In diese Schichten nun müssen dann Endpunkte von Kraftlinien hineinfallen, welche im Falle homogener Flüssigkeit nur auf den metallischen Oberflächen sitzen würden. Dadurch wird sozusagen der Abstand zwischen Flügel und Quadranten verringert, eine grössere Kraft wird also ausgeübt, und der Flügel folgt dem ihn umgebenden Häutchen.

Frühere Beobachter haben alle mit weit geringerer Genauigkeit gearbeitet, auch leitete ihr Wasser von vorne herein schon viel besser. Doch glaube ich, dass die um $1\frac{1}{2}$ —2% höhere Zahl, welche Tereschin für die D-C. des Wassers angiebt, wohl mit auf die geschilderte Fehlerquelle zurückzuführen ist. In Rosa's Curve Phil. Mag. (5) 31, Taf. VI, Fig. 7, könnte man diese scheinbare zeitliche Abnahme von K angedeutet finden, doch liefern auch die Beobachtungsgruppen 9 und 10 wieder etwas höhere Zahlen. Dass der absolute Werth, welchen Rosa angiebt, mit seinem Temperaturcoefficienten meinen Resultaten vergleichbar gemacht, noch um $2\frac{1}{2}$ —3% klei-

ner ist, als letztere, kann bei der ungünstigen Construction von Rosa's Apparat nicht Wunder nehmen.

Bei den Wasserbeobachtungen habe ich anfangs mit ersten Ausschlägen gearbeitet, doch ist es bei einer Schwingungsdauer von 20 Secunden auch im Falle starker Dämpfung unbequem, immer warten zu müssen mit der nächsten Ablesung (bei neuer Commutatorlage und neuem W_L), bis die Nadel völlig still steht. Daher leitete ich zuletzt die gesuchten Ruhelagen je aus 2 Umkehrpunkten ab, die ich jedesmal beobachtete. Es gewährt das eine grosse Erleichterung, da man die erforderlichen Manipulationen an Rheostat und Commutator, sowie die Ablesungen glatt hintereinander weg machen kann. Auch ist die Ersparniss an Zeitdauer eines Beobachtungssatzes fast grösser als das geringe Mehr, welches nun die Rechnung erfordert.

Das Dämpfungsverhältniss α der Electrometernadel bestimmte ich zwei Mal, immer als Mittel mehrerer Beobachtungen. Ich fand bei 16.4° $\alpha = 3.0$, bei 20.7° $\alpha = 2.71$. Die Zahlen stehen im richtigen Verhältniss zu einander, wie man es nach der bekannten Abhängigkeit der inneren Reibung des Wassers von der Temperatur¹⁾ zu erwarten hat. Für Beobachtungen bei anderen Temperaturen wurde nun das Dämpfungsverhältniss in eine kleine Tabelle gebracht, und dieser hernach die erforderlichen Zahlen entnommen. Sind beobachtet die Umkehrpunkte a_1 und a_2 , so ist die gesuchte Ruhelage $a_2 + (a_1 - a_2)/(1 + \alpha)$. Da die Schwingungsamplituden stets nur wenige Scalentheile betragen, so könnte selbst

1) s. z. B. F. Kohlrausch, Leitfaden d. pract. Phys. 7. Aufl. S. 141.

eine Unsicherheit von 0.1 in α noch kaum einen merklichen Fehler verursachen. Ich nahm aber stets 3 Ziffern für α , da dann immer noch mit gleicher Bequemlichkeit die Grösse $(a_1 - a_2)/(1 + \alpha)$ den Crelle'schen Multiplikationstabellen entnommen werden kann.

Als Beispiel für das bestbewährte Beobachtungsschema diene der in Tab. III mitgetheilte Satz. Zuerst wurde der Wassermotor in Gang gesetzt, dann die Temperatur abgelesen und der Nullpunkt notirt. An den für Anfang und Ende angegebenen Zeiten wurde (nach der Secundenuhr) das Zählwerk für den Commutator in Gang gesetzt, resp. ausgeschaltet. Dazwischen lagen die Ablesungen des Electrometers für die verschiedenen Widerstandsverhältnisse im Hilfsrheostat, zwischen denen zu interpoliren war. Nach Beendigung der Ablesungen und nach Ausrücken des Zählwerkes wurde der Motor angehalten, wieder Temperatur und Nullpunkt notirt, und sogleich eine Widerstandsmessung angestellt. Hierbei wurde für jede Lage des Commutators eine Ablesung gemacht, und das Mittel daraus genommen. Oft ging auch eine Widerstandsmessung den Ablesungen am Electrometer unmittelbar voraus. Stets wurde auch hierbei die Uhr notirt, und später aus der nachfolgenden und der nächstvorhergehenden Messung Widerstand und Leitfähigkeit für die mittlere Zeit der Electrometerbeobachtung interpolirt, soweit noch merkliche Aenderungen vorkamen.

Zur Rechnung ist noch zu bemerken, dass ich bei der Interpolation das Glied 2. Ordnung mit berücksichtigt habe, welches daher rührt, dass eigentlich zwischen $(W_L)^2$ und $(W_L'')^2$ linear zu interpoliren ist, obschon dasselbe in die Grenzen der Beobachtungsfehler fiel. Zur Berechnung von K dienten 5stellige Logarithmen.

Tabelle III.

10. VII. 92. Beginn: 4h 58m. Ende 5h 4m. Zählrad: 3538 Umdr.
 vorher: $t = 20^s 80$ Np = 507.5 Daraus Tourenz. rot. Comm.
 nachher: 20.80 507.1 N = 81.7 pro sec.

$W_F = 4.5 \Omega$. Zum Np 507.3 gehört $W_L = 7877.1$ (vgl. Tab. II).

	$W_L'' = 20.5 \Omega$		$W_L' = 20.1 \Omega$			$W_L = 20.5 \Omega$	
Stellung d. Commutat:	\searrow	\swarrow	\swarrow	\searrow	\swarrow	\swarrow	\searrow
a_1	504.2	511.6	504.8	510.8	504.6	510.4	503.2
a_2	506.3	509.5	505.9	509.1	506.0	508.7	506.0
$(a_1 - a_2)(1 + \alpha)$	-57	+57	-30	+46	-38	+46	-76
Ruhelage	05.73	10.07	05.60	09.56	05.62	09.16	05.24
\searrow ... \swarrow	-4.34		+3.96 +3.94			-3.92	

20.5 Ω . . . -4.13

$W_E = 2569 \Omega$

20.1 . . . +3.95

$\lambda = 3.86$

+ 0.1965 = 3.95 \times 0.4,808 (+ quadr. Glied)

+ 0.0533 = C_E

$W_L = 20.350$

$$\left(\frac{W_L \cdot W_L'}{W_F \cdot W_L} \right)^2 = \left(\frac{20.350 \cdot 7877.1}{4.5 \cdot 4000} \right)^2 = 79.31 = K'$$

Einfluss der Stromwechselzahl.

Es war nun zu untersuchen, ob die von der Beobachtung gelieferten Werthe K' nicht noch eine Abhängigkeit von der Häufigkeit des Stromwechsels zeigten. F. Kohlrausch¹⁾ hat gezeigt, dass ein Electrolyt Wechselströmen gegenüber einen scheinbaren Widerstand aufweist, welcher grösser ist als der thatsächliche Widerstand um einen Betrag, der bei gegebener Lage der Electroden proportional ist $w \cdot (\lambda/N)^2$, vorausgesetzt, dass die Tourenzahl N hoch genug sei, und dass keine Selbstinduction vorhanden, was bei unserer Versuchsanordnung

1) Pogg. Ann. 148, S. 143. 1873.

der Fall ist. Die Kraftwirkung auf den Electrometerflügel wird genau in der gleichen Weise von der Polarisation beeinflusst. Nur wird sie verkleinert, denn von dem an den Electroden gemessenen Potential subtrahirt sich noch die electromotorische Kraft der Polarisation. Es wird also die wahre D-C. K grösser sein als die scheinbar beobachtete K' , so zwar, dass

$$K = K' \left(1 + H \cdot \frac{\lambda^2}{N^2} \right)$$

Aus den in Tab. IV mitzutheilenden 3 Beobachtungsreihen finde ich für die Constante $H = 1.16$. Dabei ist unter N die Tourenzahl des Commutators, also die Anzahl der ganzen Perioden pro Secunde, verstanden. λ ist wie immer in 10^{-10} . Hg -Einheiten gemessen.

In der folgenden Tabelle sind neben die direct gefundenen Zahlen K' die Correctionen $K.H.\lambda^2/N^2$ gesetzt, dann die reducirten Werthe K . Als Mittelwerth der drei Gruppen von Beobachtungen erhält man

$$K = 79.56 \text{ bei } 20.75^\circ$$

Die Uebereinstimmung der Einzelwerthe K unter einander controlirt man am besten an der Hand der Col. 8. Dieselbe enthält für die Beobachtungstemperaturen mit Hilfe der Poisson-Mossotti'schen Gleichung $d.(K+2)/(K-1) = D^4$

berechnete Zahlen. Die Dichtigkeit des Wassers d wurde der Tabelle von Marek²⁾ entnommen. Aus dem angegebenen Mittelwerth von K folgt dann die Constante der Formel $D = 1.0361887$

1) Literatur und Anwendbarkeit dieser Formel findet man ausführlich besprochen bei Lebedew, Wied. Ann. 44, S. 304 ff. 1891. S. auch Cohn, Berl. Ber. 50, S. 1037. 1891.

2) Wied. Ann. 44, S. 172. 1891.

Tabelle IV.

	t	λ	N	K'	$HK\lambda^2/N^2$	K beob.	K ber. aus 79.56 bei 20.75	Δ beob. — ber.	
9. VII 1892.									
	12 ^h 33 ^m	20.70	3.16	81	79.62	0.14	79.76	79.58	+0.18
	3 53.5	70	3.27	81	79.28	.15	43	58	— .15
	4 10.5	73	3.28	54.5	79.34	.33	67	57	+ .10
	25.5	71	3.30	43.5	79.00	.53	53	58	— .05
	42	71	3.31	42.1	78.95	.57	53	58	— .05
	5 15	70	3.32	53.4	79.31	.36	67	58	+ .08
	41	70	3.33	71	79.43	.20	63	58	+ .05
	6 1	70	3.34	73	79.39	.19	58	58	+ .00
	9 40	71	3.45	82	79.33	.16	60	58	+ .02
	10 35	72	3.47	83	79.50	.16	66	57	+ .09
10. VII. 1892									
	8 ^h 6 ^m	20.70	3.67	76	79.45	.21	66	58	+ .08
	10 12.5	74	3.73	81	79.38	.20	58	56	+ .01
	29	74	3.74	58.1	79.12	.38	50	56	— .06
	46	74	3.74	46.8	79.01	.59	59	56	+ .03
	11 4	74	3.74	46.1	79.00	.61	51	56	— .06
	24	74	3.75	59.4	79.11	.37	48	56	— .09
	48	74	3.76	79	79.29	.21	50	56	— .06
	12 43.5	74	3.78	79	79.34	.21	55	56	— .01
	4 ^h 18 ^m	20.82	3.85	74	79.27	.25	52	53	— .01
	5 1	80	3.86	81.7	79.31	.21	51	54	— .02
	16.5	80	3.86	58.5	79.17	.40	58	54	+ .04
	32	80	3.87	46.5	78.97	.64	61	54	+ .07
	48	80	3.87	47.2	78.94	.62	56	54	+ .02
	6 6.5	80	3.88	60.0	79.11	.39	50	54	— .04
	28	80	3.88	83.0	79.33	.20	53	54	— .01
	7 17.5	78	3.88	84.4	79.27	.20	47	55	— .08

Wie man sieht, ist die Uebereinstimmung der Beobachtungen eine ganz ausserordentlich gute. Freilich

zeigt auch die Temperatur eine schöne Constanz, und ebenso änderte sich der Nullpunct nur ganz ausserordentlich wenig. Nur selten kommen Abweichungen vor, welche $1\text{ }^{\circ}/_{00}$ übersteigen. Die Rechnungen sind mit einer Ziffer mehr ausgeführt, als hier mitgetheilt.

Von früheren Beobachtungsreihen war nur eine so weit ausgedehnt worden, dass die anfänglichen Störungen verschwunden waren. Hier liegen vom 2. Tage nach dem Eingiessen folgende Ergebnisse vor:

Tabelle V.

26 ^h nach Eingiessen.	t	λ	N	K'	K beob.	K ber. aus 79.56 bei 20.75	Δ beob. — ber.
20. VI. 1892.							
5 ^h 24.5 ^m	16.26	3.03	80	81.36	81.50	81.44	+ 0.06
45.5	16.30	3.04	75	81.35	50	81.42	+ 0.08
6 4	16.34	3.07	83	81.26	39	81.41	— 0.02

Von diesen Beobachtungen sind die erste und letzte mit ersten Ausschlägen gemacht, bei der zweiten wurden Umkehrpuncte notirt. Wie man sieht, geben beide Beobachtungsweisen das gleiche Resultat. Ueberdies stimmt die Differenz von $24\text{ }^{\circ}/_{00}$ gegen die Beobachtungen der Tab. IV genau mit dem Betrage, welchen die Formel verlangt.

Doch können auf diese Uebereinstimmung zunächst noch keine weiteren Schlüsse gebaut werden. Denn es werden immerhin geringe Lagenänderungen der Electrometernadel durch das Eingiessen des Wassers erzeugt, wie aus der Verlegung des Nullpunctes um einige Scalentheile zu erschen ist. Also kann nicht erwartet werden, dass

Beobachtungen, die an verschiedenen Füllungen des Electrometers angestellt sind, unter einander so grosse Uebereinstimmung zeigen, wie die Einzelmessungen einer zusammenhängenden Reihe. Das zeigt sich nun auch in den folgenden Beobachtungen, die an einer weiteren Füllung des Electrometers angestellt, und durch mehrere Tage hindurch fortgesetzt wurden. Die nachfolgende Tabelle giebt wieder die analogen Daten wie die vorhergehenden.

Der absolute Werth der gefundenen D-C. ist nicht unerheblich geringer als er aus $K = 79.56$ bei 20.75° (Tab. IV) nach der Mossotti'schen Formel berechnet wird. Die Formel giebt $K = 81.35$ bei 16.5° . Aus den Beobachtungen vom 20. VI. (Tab. V) folgt $K = 81.4$ bei 16.5° . Die jetzt gefundenen Zahlen sind kleiner um 0.3 resp. 0.4. Diese Abweichung von $\frac{1}{2}\text{ }^{\circ}/_{00}$ könnte nun aus den erwähnten Gründen noch erklärlich erscheinen, doch ist es bei graphischer Darstellung von K als $f(t)$ in hohem Maasse auffallend, dass die gefundenen Werthe sich in so ausgesprochener Weise um zwei distincte Curven gruppieren, welche um $\Delta = 0.16$ auseinanderliegen. Die eine Curve ist mit der Mossotti'schen Formel aus $K = 80.93$ bei 16.5° , die andere aus $K = 81.09$ bei 16.5° zu berechnen. Eine beobachtete Zahl fällt ganz heraus, nämlich die v. 24. VII, 6^h 28^m. Jedenfalls muss dort ein grobes Versehen vorgekommen sein, welches jetzt nicht mehr zu ermitteln ist. Die Rechnung ist wieder und wieder verificirt worden. In der Tabelle sind zwei Columnen „berechneter“ Zahlen angegeben, um jene Gruppierung zu zeigen. Ich habe vergeblich gesucht, dieselbe zu erklären, für reell muss man sie wohl halten im Hinblick auf den vorzüglichen Anschluss der Beobachtungen an

Tabelle VI.

	t	λ	K beob.	K_1 ber. aus 80.93 b. 16.5	K_2 ber. aus 81.09 b. 16.5	J_1 $K - K_1$	J_2 $K - K_2$
23. VII. 1892							
7 ^h 42 ^m	14.04	1.84	81.78	81.78		- 0.00	
5 10	16.18	2.23	81.10	81.05		+ 0.05	
5 30	25	2.25	81.05	81.02		+ 3	
47	30	2.25	80.97	81.00		- 3	
7 13.5	47	2.29	80.94	80.94		+ 0	
9 39.5	58	2.35	81.14		81.06		+ 0.08
10 5	59	2.35	80.88	80.90		- 2	
42	62	2.37	80.99		81.04		- 5
24. VII. 1892							
6 ^h 1.5 ^m	14.50	2.35	81.60	81.63		- 3	
21	49	2.34	81.78		81.80		- 2
49.5	46	2.36	81.77		81.81		- 4
7 2	49	2.36	81.80		81.80		- 0
10 2.5	15.27	2.43	81.52		81.53		- 1
18.5	37	2.44	81.58		81.50		+ 8
11 52	90	2.49	81.31		81.31		+ 0
12 5	93	2.50	81.33		81.30		+ 3
12 ^h 40 ^m	Electrom. mittelst Heber entleert, frisches Wasser eingefüllt.						
53	16.12	1.31	81.07	81.07		- 0	
3 50	48	1.58	81.12		81.10		+ 2
4 16	50	1.61	81.06		81.09		- 3
43	53	1.64	80.90	80.92		- 2	
5 32.5	62	1.71	81.06		81.05		+ 1
6 28	69	1.76	80.66	80.86		(- 20)	
48	70	1.78	80.82	80.85		- 3	
7 17.5	70	1.81	80.84	80.85		- 1	
25. VII.							
9 54.5	15.70	2.24	81.26	81.22		+ 4	
10 27	86	2.25	81.15	81.17		- 2	
				Differenz:		Mittl. Abweich.:	
				$K_2 - K_1 = 0.16$		± 0.022	± 0.031

die nach Mossotti's Formel berechneten Curven. Bei den Versuchen sind verschieden hohe Hilfspotentiale angewendet worden, ich habe die Grenzen, zwischen denen W_L interpolirt wurde, in der mannigfaltigsten Weise abgeändert, ebenso die Reihenfolge der Einzelablesungen, (doch stets derart, dass die Symmetrie des Versuchsschemas Tab. III. erhalten blieb). Auch zeigen die Versuche an Wasser verschiedener Leitfähigkeit gar keine Unterschiede untereinander. Doch nirgendwo findet sich eine Andeutung, dass dabei in gesetzmässiger Weise die scheinbaren Werthe K sich geändert hätten. Ich vermute schliesslich, dass irgendwo in den Leitungen ein Contact- oder Isolationsfehler bestanden haben mag, der diese Störungen veranlasst hat, und ich bin geneigt, $K = 80.93$ bei 16.5° als Resultat dieser Versuchsreihe aufzufassen. Da aber die vermutheten Fehler nicht bewiesen werden können, weil Zeitmangel mir eine weitere kritische Beobachtungsreihe unmöglich macht, so muss ich mich zunächst darauf beschränken, als Resultat aller angestellten und mitgetheilten Messungen anzugeben

$$K = 81.1 \text{ für Wasser von } 16.5^\circ,$$

mit einer Unsicherheit von höchstens 0.5 %.

Ueber die genauere Gültigkeit der Mossotti'schen Formel ist somit im Augenblicke auch nichts weiter auszusagen, und es muss der Arbeit des kommenden Winters überlassen bleiben, diese interessante Frage zur Entscheidung zu bringen. Dass mit den beschriebenen Apparaten und Methoden das von der Theorie verlangte Maximum von K bei 4° sich noch mit Sicherheit muss constatiren lassen, wenn es überhaupt vorhanden ist, kann nach den mitgetheilten experimentellen Daten nicht zweifelhaft erscheinen.

Adler¹⁾ hat kürzlich auf die der Poisson-Mos-sotti'schen Gleichung ähnliche Formel von Betti aufmerksam gemacht. Dieselbe lautet

$$K = \frac{D}{D - 3d}$$

und vermeidet die Schwierigkeiten, welchen die physische Deutung von D als „Maximaldichte“ der betreffenden Substanz, oder Dichte ihrer Molekeln selbst, ausgesetzt ist. Denn bei der Annahme kugelförmiger Molekeln, welche Poisson's theoretischer Ableitung zu Grunde liegt, ist ein der Einheit so nahes Verhältniss von d/D , wie es z. B. beim Wasser gefunden wird, ganz unmöglich.

Doch bisher hat sich die Poisson-Mos-sotti'sche Gleichung als empirische Formel gut bewährt; Betti's Gleichung dagegen kann auf den Temperatur-coefficienten der D-C. des Wassers z. B. keinenfalls Anwendung finden.

Denn während nach Poisson

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{(K-1)(K+2)}{3d} \cdot \frac{\partial d}{\partial t}$$

mit der Erfahrung übereinstimmt, müsste der Temperaturcoefficient nach Betti

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{(K-1) \cdot K}{d} \cdot \frac{\partial d}{\partial t}$$

im Falle des Wassers 2.9 mal grösser sein, als er thatsächlich ist.

Physikalisches Institut Strassburg, August 1892.

1) Wied. Ann. 44, S. 173. 1891.

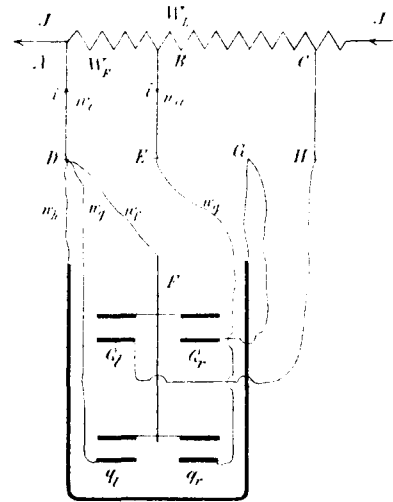


Fig. 1.

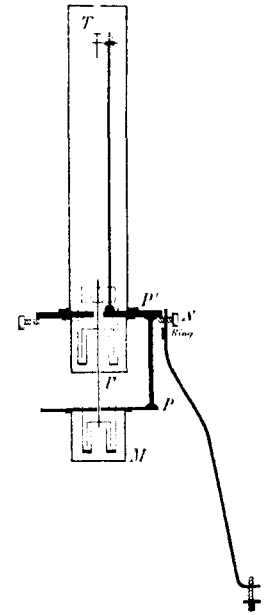


Fig. 2. Uebersicht.

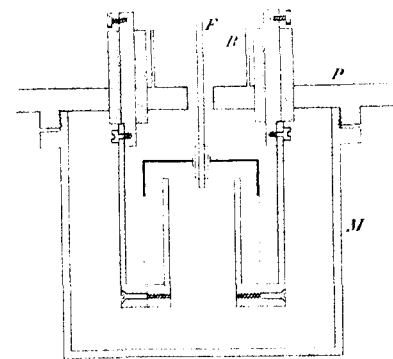


Fig. 3. Uebersicht.

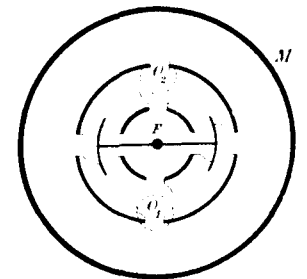


Fig. 4. Uebersicht.

Thesen.

- 1) Es giebt keine Electricität.
- 2) Es giebt nur geschlossene Magnetkraftlinien.
- 3) Um unsere Unkenntniss der specifischen Wärme des Wassers zu beseitigen, haben nur solche Methoden Aussicht auf Erfolg, welche mit Erwärmung durch den galvanischen Strom operiren.
- 4) Es ist verfehlt, objective Messungen ausgestrahlter Energie der Werthschätzung von Lichtquellen zu Grunde legen zu wollen, so lange nicht eine Substanz gefunden ist, deren Absorptionsverhältnisse der Empfindlichkeit des Auges für Strahlen verschiedener Wellenlänge proportional sind.
- 5) Die electromagnetische Natur der Lichtschwingungen ist als erwiesen zu betrachten.
- 6) Die Berechnung von „Refractionsäquivalenten“ entbehrt bislang einer rationellen Grundlage.
- 7) In verdünnten Salzlösungen ist eine sehr merkliche Bethheiligung des Wassers an der Electricitätsleitung anzunehmen.