

# **Universitäts- und Landesbibliothek Tirol**

## **Leitfaden der praktischen Physik**

**Kohlrausch, Friedrich**

**Leipzig [u.a.], 1896**

Elektrostatik

## Elektrostatik.

### 84. Allgemeines über elektrostatische Arbeiten.

**Isolirung.** Gut isolirende Stützen liefert Schellack. Zur Beseitigung der Oberflächenleitung des Glases dient Abwaschen oder besser Abkochen mit destillirtem Wasser und Trocknen in staubfreier Luft. Frisch gereinigte Gläser isoliren meistens gut. Die dauerhafteste Isolirung liefert Flintglas, schwer schmelzbares Kaliglas, alkalifreies Glas aus Jena; oder auch ein Überzug von Schellack. Paraffin isolirt gut, deformirt sich aber leicht. Paraffinirtes Holz (7 19) genügt für manche Zwecke. Für höhere Temperaturen leisten parallel zur Axe geschnittene Quarzplättchen gute Dienste.

Wenn die Entladung eines gewöhnlichen Elektroskops durch die Berührung mit einem abgeleiteten Körper eine merkliche Zeit in Anspruch nimmt, so ist der Widerstand des Körpers mindestens auf die Ordnung  $10^{10}$  Ohm zu schätzen.

Influenzmaschinen hält man am einfachsten durch Anwärmen der Scheiben mit einem zwischengesetzten Petroleumlämpchen (Ganglampe) trocken. Man achte auf Fasern der Transmissionsseile und ähnliches.

**Schutzhüllen.** Um Influenzwirkungen nach und von außen zu beseitigen, schliesse man die Apparate und Leitungen in zur Erde abgeleitete, metallische Hüllen ein (Pappe, innen mit Stanniol überzogen; Netz aus Draht oder aus Stanniolstreifen, die auf, oder besser in die Glashüllen geklebt sind u. dgl.).

**Vorsichtsmaßregeln** bei der Messung mit abgetrennten Elektrizitätsmengen. Zur Vermeidung von Reibungselektricität füllt man in Kommutatoren u. dgl. das Quecksilber in Fingerhüte, welche in eine isolirende Unterlage eingesetzt werden.

Messungen kleiner Kapacitäten verlangen Zuleitungen, Kommutatoren u. dgl. von kleiner Kapazität. Man stellt Kommutatoren z. B. aus Platindrähtchen an Schellackstäbchen her und bewirkt die Verbindungen durch ebenso gehaltene Platindrahtbügel.

Kondensatoren für genauere Messungen sollen keine Rückstände liefern. Man wähle Luftkondensatoren oder auch solche mit Paraffin; bei der Herstellung werden die Kondensatorplatten unter Vermeidung von Verunreinigungen (z. B. Öl) in flüssiges Paraffin völlig eingetaucht; s. Arons, Wied. Ann. 35, 291. 1888.

Rückstandsfreie Träger werden durch kleine, abgeleitete, nicht ganz bis an ihre Enden mit Paraffin ausgegossene Metallröhrchen geliefert, in deren Axen die Leitungsdrähte laufen.

Erzeugung konstanter Potentiale. Am besten dienen viel-paarige galvanische Ketten, z. B. Spamer'sche Chromsäureelemente (S. 284). Höhere Potentiale werden durch Leidener Batterien geliefert.

Nullpunkt des Potentials. Messbar sind nur Differenzen von Potentialen. Um für diese einen allen Apparaten einer Versuchsanordnung gemeinsamen Anfangspunkt, ein Potential „Null“, festzulegen, verbindet man alle auf demselben zu haltenden Körper mit der Erde (Wasserleitung, Gasleitung, Erdplatte).

Im Folgenden ist unter Potential stets die Potentialdifferenz gegen den gewählten Nullpunkt verstanden.

### 84a. Messung von Potentialen (Spannungen). Elektrometer.

#### I. Sinus-Elektrometer (R. Kohlrausch).

Ablenkung der Magnetonadel um den Winkel  $\varphi$ , in einer ein für allemal bestimmten Stellung zu dem abstofsenden Arm, bedeutet das Potential  $V = CV \sin \varphi$ .

Die konstante Stellung erkennt man durch einen Spalt an dem Koincidiren des zweimal gespiegelten Bildes einer Marke mit einem Punkte auf dem Spiegel der Nadel.  $\varphi$  ist der Winkel, um welchen man bis zu diesem Einspielen der Nadel das Instrument von dem Nullpunkte an nachdrehen mußte.

Verschiedene Nadeln sowie verschiedene Stellungen derselben gegen den Arm ermöglichen sehr verschiedene Werte von  $C$ . Um diese auf einander zu reduciren, wird eine, einige Zeit zuvor geladene Leidener Batterie von großer Kapazität unter den zu vergleichenden Umständen mit dem Instrument verbunden und  $\varphi$  beobachtet. Den Elektrizitätsverlust eliminirt man durch alternirendes Beobachten in gleichen, kurzen Zeitintervallen.

R. Kohlrausch, Pogg. Ann. 88, 497. 1853.

#### II. Quadrantelektrometer (Thomson).

Einstellung. Die beiden Quadrantenpaare sollen gleichmäßig auf die „Nadel“ wirken. Zu diesem Zwecke stelle man bei Ableitung sämtlicher Elektrometerteile zur Erde die Symmetrielinie der Nadel in einen Trennungsdurchmesser der Quadranten ein.



Genauere Orientirung. Man dreht die Nadel mittels der Aufhängung so, daß der bei abgeleiteten Quadranten unter Anlegung eines hohen Potentials an die Nadel eintretende Ausschlag ein Minimum wird,

oder besser, daß die unter Vorzeichenwechsel dieses hohen Potentials eintretenden entgegengesetzten Ausschläge gleich werden.

Nach einer frischen starken Ladung der Nadel ist das Gleichgewicht zuweilen instabil. Oft hilft bloßes Abwarten. Sonst verstelle man, wenn dies möglich ist, einen Quadranten, oder versuche, ob eine Änderung der Nadellage hilft; oder endlich, man gebe eine schwächere Ladung.

Allgemeine Formel. Werden die Quadrantenpaare und die Nadel bez. auf die Potentiale  $Q_1$ ,  $Q_2$  und  $N$  gebracht, so tritt eine mit Spiegel und Skale (48, 49) zu beobachtende Drehung der Nadel um den Winkel  $\alpha$  ein

$$\alpha = C(Q_1 - Q_2)(N - \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2)),$$

wo  $C$  die Elektrometerkonstante ist (84c).

Die Zuleitung zum „Biscuit“ geschieht von oben durch den Aufhänge-Draht oder versilberten Quarzfaden oder aber von unten durch den in Schwefelsäure tauchenden Beruhigungsflügel.

#### Mit Hilfsladung.

1. Quadrantschaltung. Das eine Quadrantenpaar wird dauernd auf dem Potential Null, die Nadel auf einem gegen das zu messende hohen Potential gehalten. Letzteres geschieht mit einer andererseits abgeleiteten vielpaarigen Kette oder bei geringeren Anforderungen an Konstanz mit einer Zamboni'schen Säule oder einer, oft schon mit dem Instrument verbundenen Leidener Flasche.

Die Ladung des zweiten, vorher abgeleiteten Quadrantenpaares zu dem Potential  $V$  bewirkt dann eine mit  $V$  nahe proportionale Ablenkung. Die meist vorhandene Unsymmetrie der Ausschläge wird mittels Kommutiren von  $V$  durch Messung des Gesamtausschlages eliminiert.

Die Ausschläge für  $+V$  und  $-V$  sind nach der Formel gleich  $CV(N - \frac{1}{2}V)$  und  $CV(N + \frac{1}{2}V)$ , sie unterscheiden sich also von einander um  $V/N$  ihres Betrages, z. B. um 2%, wenn 50 Chromsäure-Elemente (100 Volt) die Nadel laden und wenn 2 Volt gemessen werden.

2. Nadelschaltung. Die beiden Quadrantenpaare werden dauernd durch Verbinden mit den Polen einer vielpaarigen galvanischen Kette, deren Mitte zur Erde abgeleitet ist, auf entgegengesetzt gleiches Potential geladen. Verbindet man die vorher abgeleitete Nadel dann mit dem zu messenden Potential  $V$ , so tritt (siehe die obige Formel) eine mit  $V$  proportionale Ablenkung ein. Eventuell vertausche man das Vorzeichen

von  $V$  mittels eines Kommutators. Vollkommene entgegengesetzte Gleichheit der Quadrantenpotentiale ist nicht nötig.

Bei Beobachtungen mit Hilfsladung muß man wegen der Schwankungen des Hilfspotentials von Zeit zu Zeit die Empfindlichkeit bestimmen (84c I).

Ohne Hilfsladung (Doppelschaltung) für gröfsere Potentiale.

Die Nadel und das eine Quadrantenpaar sind abgeleitet. Das vorher abgeleitete zweite Quadrantenpaar gebe dann mit einem Potential  $V$  einen Ausschlag  $e$ , so ist

$$V = c \cdot \sqrt{e}.$$

Statt die mit der Nadel verbundenen Quadranten abzuleiten, die anderen zu laden, kann man auch umgekehrt verfahren.

Gröfsere Skalenausschläge werden auf Winkel reducirt (49); doch kann man die Korrektion auch mit der Kaliberkorrektion (84c) vereinigen. Ferner ist bei genaueren Messungen der mittlere Ausschlag bei gleichzeitiger Vertauschung der Quadranten und des Potentialvorzeichens zu nehmen, um Kontakt-Potentialdifferenzen zwischen den Elektrometerteilen zu eliminiren. Ohne dies können erhebliche Fehler entstehen. S. Hallwachs, Wied. Ann. 29, 1. 1886; 55, 170. 1895.

Die Konstanz ist hier nur bedingt durch die Konstanz der Aufhängung in Bezug auf Direktionskraft, Länge und Torsion und ist durch sehr feine Metalldrähte oder versilberte Quarzfäden in weitem Umfang erreichbar.

Die Empfindlichkeit variirt mit Vertikalverschiebungen der Nadel und läfst sich dadurch variiren. Bei genaueren Messungen stelle man aber die Nadel womöglich in die Mitte der Quadrantenschachtel, die Minimumlage der Empfindlichkeit. Ein Nachlängen der Suspension hat dann weniger Einfluss, auch wird die Symmetrie der Ablenkungen in dieser Lage am wenigsten durch Verbiegungen der Nadel, ungleiche Höhe der Quadranten etc. gestört.

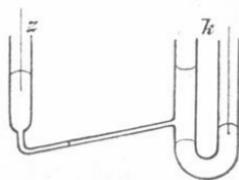
Die dämpfende Flüssigkeit (Schwefelsäure, staubfrei) veranlaßt häufig Nullpunktverschiebungen, Kriechen der Nadel. Das Beruhigungsplättchen soll an einem äufserst feinen platinirten und geglühten Platindraht (7, 18) aufgehängt sein, der central durch die Flüssigkeitsoberfläche geht. Über andere Dämpfung s. Hallwachs l. c.

Formen des Quadrantelektrometers s. bei Kirchhoff, Branly, Mascart, Edelman, Hallwachs.

### III. Kapillar-Elektrometer (Lippmann).

Die Kapillarspannung in einer mit verdünnter Schwefelsäure in Berührung stehenden Quecksilberoberfläche wird durch Polarisation mit Wasserstoff um einen Betrag verkleinert, welcher der Polarisation nahe proportional ist, so lange diese unter etwa  $\frac{1}{10}$  Volt bleibt. Später wird die Abnahme langsamer; einem Minimum der Kapillarkonstante bei etwa 1 Volt folgt dann wieder eine Zunahme.

Wässrige Schwefelsäure (25% etwa) steht mit Quecksilber in Berührung einerseits in der Kapillare einer eng ausgezogenen Glasröhre, andererseits in einem weiten Glasrohr. Aus beiden Quecksilbermassen ragen Platindrähte  $z$  und  $k$  als Elektrometerpole heraus. Der negative Pol der zu messenden Spannungsdifferenz, welche  $< 1$  Volt sein muß, wird mit  $z$ , der andere mit  $k$  verbunden. Man beobachtet entweder mit einem Mikroskop die GröÙe der Verschiebung oder die GröÙe der Druckänderung, welche die Kontaktstelle auf den Nullpunkt zurückführt. Nullpunkt ist Einstellungspunkt bei metallischer Verbindung von  $z$  mit  $k$ .



Die Aichung des Instrumentes geschieht, unter Benutzung des Satzes von der Proportionalität der Änderung mit kleinen Spannungen, durch bekannte Elemente (63, S. 283 ff.).

Nach Anwendung einer zu großen oder einer verkehrt gerichteten Spannung ist das Quecksilber an der Berührungsstelle in der Kapillare zu erneuern.

Lippmann, Pogg. Ann. 149, 546. 1873. Einfache Formen für das Kapillar-Elektrometer s. z. B. bei Ostwald, physiko-chemische Messungen S. 243.

### IV. Andere Elektrometer.

1. Hankel'sches Elektrometer. Das Gold- oder Aluminiumblatt oder der versilberte Quarzfaden und die beiden seitlichen Ladungsplatten spielen dieselbe Rolle wie unter II Nadel und Quadrantenpaare. Man benutzt die gleichen Schaltungen wie dort. Ein Mikroskop mit Okularmikrometer mißt die Verschiebungen an einem feinen Zacken des Blättchens. Für scharfe Einstellung beleuchtet man mit einer nicht großen Gasflamme aus einiger Entfernung.

Das Instrument hat sehr kleine Kapazität und momentane Einstellung. Bei maximaler Empfindlichkeit läßt sich 0,01 Volt beobachten. Durch Entfernen oder Annähern der Seitenplatten bzw. Änderung des Hilfspotentials wird die Empfindlichkeit variiert. Doppelschaltung mißt bis etwa 100 Volt.

2. Blattelektroskope. Aluminium- oder Goldblatt-Elektroskope mit geeignetem Gradbogen lassen Potentiale von 50 bis 10 000 Volt messen. Die Blättchen sollen möglichst in abgeleitete Metallhüllen eingeschlossen sein (84). Die Skala muß empirisch graduirt werden.

Über ein Elektroskop für Potentiale von 50—200 Volt s. Exner, Wiener Berichte 95 II, 1088. 1887; ein dergl. mit einem um eine Axe spielenden Aluminiumstreifen für 500—10 000 Volt s. bei Braun, Wied. Ann. 31, 857. 1887 u. 44, 771, 1891.

3. Righi'sches Reflexionselektrometer, für stärkere Spannungen von etwa 3000 bis 25000 Volt, als Hilfsapparat des absoluten Elektrometers besonders geeignet (84b). Eine Nadel, welche auf das zu messende Potential  $V$  geladen wird, wird durch ihre unsymmetrische Stellung zu zwei Ausschnitten im Gehäuse oder dgl. abgelenkt. Die Ausschläge  $e$  sind dem Quadrat von  $V$  genähert proportional. Bei der empirischen Graduierung (84c) kann man die Formel  $V = c\sqrt{e(1-ce)}$  zu Grunde legen. Über Flüssigkeitsdämpfung s. S. 402.

Eine andere Anordnung für 6000 bis 60 000 Volt s. Heydweiller, Z. S. f. Instr. 1892, 377.

#### Vergleichung elektromotorischer Kräfte.

Die el. Kraft einer Säule ist dem Potentialunterschiede an ihren Polen proportional, wonach sich die el. Kräfte wie die am Elektrometer hervorgebrachten Ausschläge verhalten.

Auch der Potentialunterschied (die Spannung) zwischen verschiedenen Punkten eines geschlossenen Stromkreises, z. B. die Klemmspannung einer Dynamomaschine läßt sich elektrometrisch bestimmen.

#### Vergleichung von Widerständen.

Man schalte die zu vergleichenden Widerstände gleichzeitig hinter einander in denselben Stromkreis ein, dessen Konstanz man prüft, bringe die beiden Endpunkte von einem derselben

mit den Zuleitungsdrähten in Verbindung und beobachte den Ausschlag des Elektrometers. Verfährt man mit dem anderen Widerstande ebenso, so gibt das Verhältnis der Potentialunterschiede das Verhältnis der Widerstände.

Um elektrolytische Widerstände so zu bestimmen, verbindet man die Enden des Elektrolytes, der sich in einer kalibrierten engen Glasröhre befindet, durch Vermittelung von polarisationsfreien Elektroden (Zink in Gefäßen mit Zinksulfatlösung, welche in geeigneter Weise mit den Enden der Glasröhre zusammenhängen) mit dem Elektrometer.

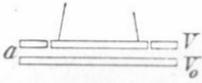
Bouty, Ann. d. ch. (6) III; 433. 1884.

#### Messung einer Strom-Energie.

Ein Elektrometer in Doppelschaltung werde an das eine Ende eines Widerstandes  $w$  im Stromkreis angelegt, während das andere Ende von  $w$  abgeleitet ist. Der Ausschlag, geteilt durch  $w$ , ist der Strom-Energie/sec innerhalb der Strecke  $w$  proportional, wenn innerhalb  $w$  keine el. Kräfte liegen. Dies gilt in induktionsfreien Leitern auch für Wechselströme.

#### 84b. Absolute Messung eines Potentials in elektrostatischen Einheiten. (W. Thomson.)

Eine bewegliche von einem Schutzringe umgebene, kreisförmige ebene Platte von der Größe  $f$  hängt über einer größeren festen Platte in einem kleinen Abstände  $a$ . Der Potentialunterschied  $V - V_0$  bedingt dann eine gegenseitige Anziehungskraft  $k = \frac{1}{8} f / \pi \cdot (V - V_0)^2 / a^2$ . Man erhält also



$$V - V_0 \text{ oder, wenn } V_0 = 0 \text{ ist, } V = a\sqrt{8\pi k/f}.$$

Alle Längen in cm,  $k$  in Dynen gemessen, kommt  $V$  in elektrostatischen [C-G-S], von denen eine Einheit 300 Volt beträgt. (Anh. 6, 12 u. 20.)

Für  $f$  ist genauer zu setzen, wenn  $R$  und  $R'$  die Halbmesser der beweglichen Scheibe und des Schutzringes bedeuten, also  $b = R' - R$  die Breite der schmalen Fuge,

$$f = \frac{\pi}{2} \left( R^2 + R'^2 - \frac{R'^2 - R^2}{1 + a/(0,22b)} \right).$$

Die Schwierigkeit,  $a$  genau zu messen, umgeht man so: Die feste Platte wird auf irgend ein konstantes, nicht zu kleines Potential von entgegengesetztem Vorzeichen wie das zu messende geladen, während die bewegliche Platte zunächst zur Erde abgeleitet wird. Die dadurch in der Nullstellung ausgeübte Kraft sei  $k$ . Jetzt werde der beweglichen Platte das zu messende Potential  $V$  mitgeteilt. Damit dieselbe dann wieder in ihre Normalstellung kommt, müsse der Abstand  $a$  um  $l$  vermehrt werden. Alsdann ist  $V = l\sqrt{8\pi k/f}$ .

Kirchhoff'sche Wage. Die bewegliche Platte bildet die Schale einer Wage, mit dem Schutzring in einer Ebene liegend wenn der Wagezeiger auf Null steht. Ein Anschlag der zweiten Wagschale verhindert weitere Annäherung an die tiefer stehende feste Platte.

Wird letztere auf ein Potential  $V$  geladen, so muß man auf die zweite Wagschale  $p$  Gramm legen, damit die Wage umzukippen beginnt. Das Potential bestimmt sich dann nach der oben gegebenen Formel, wenn man  $k = 981 \cdot p$  setzt. Der Beginn des Umkippen wird durch das Aufhören eines galvanischen Stromes scharf fixiert, welcher durch den Anschlag zur zweiten Wagschale fließt.

Näheres s. Quincke, Wied. Ann. 19, 561. 1883; Czermak, Wiener Berichte 97, 307. 1888. — Vgl. Maxwell, Elektr. I, § 217. 218. Wiedemann, Elektrizität, 4. Aufl. I, S. 182.

Das Verfahren ist für Potentiale von reichlich 1000 Volt an aufwärts geeignet.

Schlagweite. Dieselbe liefert unter Umständen ein bequemes Mittel zur Schätzung hoher Potentiale von mindestens einigen 1000 Volt. S. darüber Tab. 27c.

Über einen Einfluß der Ladungszeit auf die Schlagweite vgl. Toepler, Pogg. Ann. 134, 217. 1868; Jaumann, Wied. Ann. 55, 655. 1895; Über den Einfluß der Belichtung der Kathode Warburg, Berlin. Sitz.-Ber. 1896, 223.

### 84c. Aichung und Kalibrierung eines Elektrometers.

Man beobachtet die Ausschläge, welche bekannte Potentiale, an das Elektrometer angelegt, hervorbringen.

#### I. Instrumente für kleinere Potentiale.

Bekannte Potentiale liefern Normalelemente von bekannter el. Kraft (S. 283 ff.). Zur Kalibrierung beobachtet man die Aus-

schläge, welche mehrere Elemente einzeln und in ihrem Zusammenwirken hervorbringen.

Bekannt und kontrolirbar konstant zu haltende Potentiale bekommt man ferner durch Verbindung des Elektrometers mit verschiedenen Punkten eines stromdurchflossenen Rheostaten von großem Widerstand, dessen eine Polklemme mit der Erde in Verbindung steht. Die ganze Klemmspannung des Rheostaten soll das größte zur Kalibrierung erforderliche Potential erreichen. Die Stromstärke  $i$  sei in Ampere gemessen. Liegt zwischen der abgeleiteten Polklemme und der Abzweigung zum Elektrometer ein Widerstand von  $w$  Ohm, so ist das Potential auf dem verbundenen Elektrometerteil  $iw$  Volt.

## II. Instrumente für größere Potentiale.

1. Mit einem absoluten Elektrometer; für Spannungen von etwa 1000 Volt und mehr. Die Potentiale werden durch eine, mit einer Leidener Batterie verbundene Influenzmaschine erzeugt. Am besten wird das absolute Instrument zuerst für das zu erreichende Potential eingestellt, erst dann die Ladung der beiden Instrumente vorgenommen, und zwar auf etwas höheres Potential wie das verlangte. Durch Annäherung einer abgeleiteten Spitze, Berührung mit einem Taschentuch u. dgl. bewirkt man dann ganz langsames Sinken des Potentials und liest, sobald das absolute Instrument einspielt, das zu aichende ab.

2. Mit galvanischer Kette; für Spannungen bis zu einigen Tausend Volt. Auch wenn die Spannung der Kette direkt nicht ausreicht, kann man auf folgendem Wege aichen.

a) Man verbindet die Säule mit der einen Endklemme eines Potentialverstärkers, mit der andern das Elektrometer. Ist  $z$  die Verstärkungszahl,  $V$  die Spannung der Kette (S. 283), so ist  $zV$  das Potential auf dem Elektrometer.

Hallwachs sowie Exner, l. c. (84a).

b) Der eine Pol  $P_1$  der isolirt aufgestellten Kette ist mit der innern Belegung einer großen, außen abgeleiteten Leidener Batterie dauernd verbunden. Man leite  $P_1$  ab und verbinde  $P_2$  mit dem zu aichenden oder mit einem passenden Hilfselektrometer und beobachte den der Spannung  $V$  der Kette entsprechenden Ausschlag  $n_1$ . Alsdann wird  $P_1$  von der Erde gelöst und

das Elektrometer mit  $P_1$  sowie einer Potentialquelle (Elektrisirmaschine etc.) verbunden und wieder bis zum Ausschlag  $n_1$  geladen. Jetzt hat der Pol  $P_2$  die Spannung  $2V$ .

Auf analoge Weise fortfahrend kann man beliebige Vielfache von  $V$  erzielen und an das Elektrometer anlegen. Voraussetzung ist eine gegen die Elektrometer große Kapazität der Batterie. Vgl. F. Braun, l. c. **84a**.

## 85. Messung der Elektricitätsmenge eines Kondensators.

Siehe auch **86 II**.

1. Mit dem Elektrometer. Da die Ladungsmenge in einem bestimmten Kondensator dem Potential proportional ist, so lassen sich Ladungen desselben Kondensators mit dem Elektrometer (**84a**) vergleichen. Der „Rückstand“, d. h. die bei einer kurz dauernden Entladung zurückbleibende Elektricitätsmenge äufsert keinen Einfluß auf das Potential; den Angaben des Elektrometers ist also die durch eine kurz dauernde Verbindung beider Belegungen entladene „disponibele“ Ladung proportional.

2. Mit der Lane'schen Maßflasche. Bei der Ladung einer Leidener Batterie kann man die zugeführte Elektricitätsmenge bestimmen, indem man die Belegungen isolirt und die eine mit der Elektrisirmaschine, die andere mit einer Maßflasche verbindet. Jedem Funken der Maßflasche entspricht ein bestimmter Zuwachs der Ladung der Batterie. Der Rückstand wird hier mit gemessen.

Angaben der Maßflasche bei verschiedener Schlagweite reducirt man empirisch auf einander, etwa indem man mit dem Righi'schen oder dem Sinus-Elektrometer die entsprechenden Potentiale vergleicht. Nicht zu kleine Schlagweiten sind nahezu dem Potential proportional; vgl. auch Tab. 27c und S. 406.

3. Mit dem Galvanometer. Eine große Elektricitätsmenge kann mittels ihrer Entladung durch ein Galvanometer von hinreichend isolirten Windungen bestimmt werden (**78a**). Die Gefahr eines Überspringens zwischen den Windungen oder einer Änderung des Nadelmagnetismus wird durch Einschaltung eines großen Widerstandes (feuchter Faden) vermindert.

Die elektromagnetisch gemessene Elektrizitätsmenge  $1[\text{C-G-S}]$  ist  $=10 \text{ Am. sec. oder } = 300 \cdot 10^8$  elektrostatistisch gemessenen  $[\text{C-G-S}]$ -Einheiten; Anh. Nr. 11 und 19a.

4. Mit dem Luftthermometer (Riefs). Die Depression der Flüssigkeitssäule durch eine Entladung ist proportional dem Produkt aus der entladenen Elektrizitätsmenge und ihrem Potential. Der Widerstand des Drahtes in der Thermometerkugel wird sehr groß gegen die Widerstände der übrigen Entladungsstrecken vorausgesetzt. Da die Ladung derselben Leidener Flasche oder Batterie ihrem Potential proportional ist, so verhalten sich die entladenen Mengen wie die Quadratwurzeln aus den durch sie hervorgebrachten Depressionen.

### 86. Elektrostatistische Kapazität.

Kapazität  $c$  eines Leiters ist die Elektrizitätsmenge, welche ihn zum Potential 1 ladet, während die Leiter in influenzirbarer Nähe auf Null gehalten werden. Die Kapazität hängt nicht nur von der Form des Leiters, sondern auch von seiner Lage zur Umgebung ab (Beobachter, Tisch, Wand etc.).

Kondensatoren. Kapazität schlechtweg heißt hier die Kapazität der einen (inneren) Belegung, des „Kollektors“. Zu feineren Mefszwecken benutzt man Luftkondensatoren (R. Kohlrausch), allenfalls auch solche mit Paraffin (84). Glas-, Glimmer-, Wachstafft- etc. Kondensatoren folgen wegen Rückstand und Oberflächenleitung den einfachen Kondensatorgesetzen nicht genau. Ihre Kapazität pflegt mit wachsender Temperatur zu steigen, bis über 1% auf 1°.

Vgl. z. B. Schneebeli, Zürich. Viertelj.-Schr. 1881, 160.

#### I. Aus den Dimensionen (in elektrostatistischen Einheiten).

Die Kapazität einfach gestalteter Kondensatoren läßt sich berechnen.  $a$  bedeute den konstanten Abstand der Belegungen. Die Formeln gelten für Luft als Dielektricum; ev. ist mit der Dielektricitätskonstante (86a, Tab. 24b) zu multipliciren.

Parallele Flächen. Bei relativ sehr kleinem Abstände  $a$  ist, wenn  $f$  die Fläche bedeutet, genähert  $c = f/(4\pi a)$ .

Kreisplatten-Kondensator vom Radius  $r$ . Genähert  $c = \frac{1}{4} r^2/a$ . Genauer ist ( $d =$  Plattendicke):

$$c = \frac{r^2}{4a} + \frac{r}{4\pi} \left( \log \text{nat} \frac{16\pi r(a+d)}{a^2} - 1 + \frac{d}{a} \log \text{nat} \frac{a+d}{d} \right). \quad 1.$$

Schutzring-Kondensator.  $r$  sei der Radius der Kollektorplatte,  $r'$  der innere Radius des Schutzrings,  $b = r' - r$  die Furchenbreite.

Näherungsformel:  $c = (r + r')^2/(16a)$ .

Genauer ist:

$$c = \frac{(r+r')^2}{16a} - \frac{r+r'}{2\pi} (\beta \operatorname{tg} \beta + \lg \operatorname{nat} \cos \beta), \quad 2.$$

wo  $\beta = \operatorname{arctg} \frac{1}{2} b/a$ . Die Formel setzt  $b$  klein gegen die Plattendicke voraus. Eine genaue Formel bei Kirchhoff.

Kirchhoff, Abhandl. Formel 1 S. 112, wo der Abstand aber  $= 2a$  gesetzt ist, und Formel 2 S. 117; eine andere Formel bei Maxwell, Elektr. I, § 201.

Cylinder-Kondensator von der Länge  $l$ , dem inneren Radius  $r$ , dem äußeren  $r+a$ . Wenn  $l$  groß gegen  $r$ , so ist  $c = \frac{1}{2} l / \log \operatorname{nat} \left(1 + \frac{a}{r}\right)$ ; ist auch  $a$  klein gegen  $r$ , so wird  $c = \frac{1}{2} l r/a$ .

Kugel-Kondensator. Eine Kugel vom Radius  $r$  sei ganz eingeschlossen von einer abgeleiteten anderen vom Radius  $r'$ . Die Kapazität der ersteren ist dann  $c = r r' / (r' - r)$ .

Die elektrostatistische Kapazität ist bei beliebiger Gestalt umgekehrt proportional der Größe, welche S. 280 Widerstandskapazität genannt ist, wenn man den Kondensator in eine große Flüssigkeitsmenge eingetaucht denkt und die beiden Platten als Elektroden ansieht.

Freistehende Kugel vom Halbmesser  $r$ .  $c = r$ .

Eine elektrostatistisch in cm gemessene Kapazität gibt, durch 900 000 geteilt, die Kapazität in Mikrofarad (Anh. 20a).

## II. Mit dem Elektrometer.

Man beachte, besonders bei kleinen Kapacitäten, die Bemerkungen S. 399 und zu Anfang dieses §. Die zu vergleichenden Leiter müssen so aufgestellt sein, daß sie sich nicht gegenseitig influenzieren.

Schnelle Beruhigung der Elektrometerschwingungen läßt sich durch passendes Ein- und Ausschalten von Elementen in die Erdleitung des geeigneten Elektrometer-Teils erreichen.

1. Vergleichung durch Ladungs-Teilung. Der Leiter I wird, mit dem Elektrometer (Kapazität  $\gamma$ ) verbunden, zum Potential  $V$  geladen. Der vorher abgeleitete Leiter II wird zugeschaltet: das Potential sinke auf  $V'$ . Dann ist

$$c_2 : (c_1 + \gamma) = (V - V') : V'.$$

Die Methode eignet sich für große Kapacitäten, bei denen  $\gamma$  einen geringen Einfluß hat. Sie stellt erhebliche Anforderungen an Isolation.

Die Kapazität  $\gamma$  eines Elektrometers läßt sich gerade so durch Ladungs-Teilung mit der eines Leiters, z. B. eines Kondensators, vergleichen.

Kapacitäten, namentlich des Quadrantelektrometers, auch der Zuleitungen etc. werden leicht unterschätzt. Eventuell ist auch auf die Änderung von  $\gamma$  mit der Ablenkung zu achten.

2. Vergleichung durch Gegenstellung. Man schliesse eine vielpaarige galvanische Säule durch einen grossen Widerstand (Rheostat)  $R$  und verbinde die Leiter I und II je mit einem Ende von  $R$ . An beliebiger Stelle von  $R$  sei eine Erdleitung anzubringen. Wird dieselbe so angelegt, dass nach der Abtrennung der Leiter deren Ladungen sich bei gegenseitiger Verbindung neutralisiren, so verhalten sich die Capacitäten umgekehrt wie die beiderseitigen Teile von  $R$ .

Die Capacität des Elektrometers, an welchem man die Neutralisirung prüft, kommt hier nicht in Betracht.

Beweis aus 63 I S. 282.

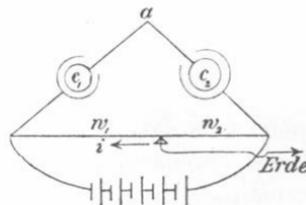
Die Methode lässt sich auf verschiedene Weise modificiren. Man kann z. B. die Leiter an die Pole der offenen Säule anlegen und die Erdleitung an der letzteren so anbringen, dass sie die Elementenzahl im Verhältnis  $c_1:c_2$  teilt.

Auch kann man, namentlich bei dem Vergleich nahe gleicher Capacitäten, dem einen Pol der offenen Säule durch einen Widerstand geschlossene Elemente zufügen. Indem man von passender Stelle des Widerstandes ableitet, lassen sich die Potentiale genau in ein solches Verhältnis bringen, dass die Ladungen sich neutralisiren. Über die Ausführung vgl. Lebedew, Wied. Ann. 44, 289. 1891.

3. Vergleichung in der Brücke. Wird der Erdkontakt so verschoben, dass bei der Verbindung von  $a$  mit dem vorher abgeleiteten Elektrometer kein Ausschlag entsteht, so ist

$$c_1:c_2 = w_2:w_1.$$

Man benutzt eine vielpaarige Säule und einen grossen Widerstand. Vor der Verbindung mit der Säule sind alle Teile zu entladen.



Beweis: Die Potentiale der äusseren Belegungen sind  $-iw_1$  und  $iw_2$ . Ist  $p$  das gemeinsame Potential auf  $c_1$  und  $c_2$ , so sind die Ladungen der letzteren  $(p+iw_1)c_1$  und  $(p-iw_2)c_2$ . Da die Summe wegen der Isolirung Null sein muss, so folgt  $p(c_1+c_2) = i(w_2c_2 - w_1c_1)$ , woraus für  $p=0$  folgt  $w_1c_1 = w_2c_2$ .

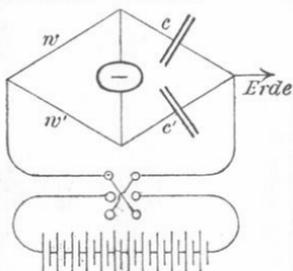
Zur Kalibrirung eines Capacitätssatzes eignen sich Nr. 2 u. 3.

### III. Mit dem ballistischen Galvanometer.

Diese Methoden geben nur bei großen Kapacitäten gute Resultate.

1. Vergleichung durch einzelne Entladungen. Man ladet die Kondensatoren zu gleichem Potential und entladet sie einzeln, bei großer Spannung unter Einschaltung eines großen Widerstandes, durch dasselbe Galvanometer (78a). Die Kapacitäten verhalten sich wie die Ausschläge. Das gleiche Potential liefert eine galvanische Säule (S. 284), wobei man mit Vorteil die Multiplikationsmethode (79) anwenden kann. Leidener Flaschen können auch mit der Elektrisirmaschine zu gleichem Potential geladen werden, indem man jene während der Ladung mit einander verbindet, oder indem man sie an ein Elektrometer legt.

2. Prüfung auf Gleichheit durch Gegenstellung. Die Ladung geschieht mit entgegengesetztem Vorzeichen, z. B. so, wie in II 2. Die Gleichheit der Ladungsmengen wird mit dem Galvanometer geprüft, durch welches beide Kondensatoren gleichzeitig entladen werden.



3. Vergleichung in der Wheatstone'schen Brücke (Sauty). Werden  $w$  und  $w'$  so regulirt, daß beim Kommutiren des Gesamtstromes kein Ausschlag entsteht, so ist  $c:c' = w:w$ .  $w$  und  $w'$  können zusammen aus einem Draht mit Schleifkontakt bestehen. Siehe auch V 1.

4. Absolute Kapazität. Die Entladung durch ein Galvanometer (vgl. Nr. 1) liefert die Kapazität  $c$  in elektromagnetischem Mafse (Anh. 20a), wenn die el. Kraft  $E$  der ladenden Säule bekannt ist. Man berechnet nach 78a die Elektrizitätsmenge  $Q$  und hat dann  $c = Q/E$ .  $Q$  in Amp.-Sec. und  $E$  in Volt gibt  $c$  in Farad.

5. Nach Maxwell.  $E$  und die Galvanometerkonstante fallen heraus bei folgendem Verfahren. Man schließt die Säule durch das Galvanometer und einen gegen den inneren Widerstand sehr großen Widerstand  $R$ ; der konstante Ausschlag sei  $= c_0$ . Der mit derselben Batterie geladene Kondensator gebe

bei der Entladung durch das Galvanometer den Ausschlag  $e$ . Der Widerstand Säule + Galvanometer sei =  $W$ , die Schwingungsdauer der ungedämpften Nadel =  $\tau$ , das Dämpfungsverhältnis =  $k$  und  $A = \log \text{nat } k$  (51). Dann ist

$$c = \frac{\tau}{\pi} \frac{1}{R+W} \frac{e}{e_0} \cdot k^{1/\pi \cdot \text{arc tg } \pi/A}.$$

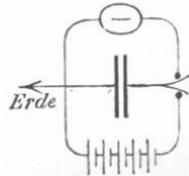
(Tab. 21b). Bei größeren Ausschlägen wird  $e$  auf den doppelten Sinus des halben Winkels,  $e_0$  auf die Tangente corrigiert (49; Tab. 21a).

Verfügt man nicht über hinreichenden Widerstand  $R$ , so kann man bei der Bestimmung von  $e_0$  die Elemente gruppenweise in gleicher Zahl parallel schalten. Der obige Ausdruck ist dann durch die Anzahl der Gruppen zu dividieren. Oder man legt eine Abzweigung an das Galvanometer; vgl. 64a.

$\tau$  in sec,  $R$  und  $W$  in Ohm liefern die Kapazität in Farad (Anh. 20a). 1 Mikروفarad =  $10^{-6}$  Farad =  $10^{-15}$  el. magnetischen =  $9 \cdot 10^5$  el. statischen [C-G-S]-Einheiten.

#### IV. Mit dem Galvanometer nach Siemens.

1. Vergleichung. Die Zuleitung zu dem Kondensator etc. wird durch eine rasch gehende Wippe (Stimmgabelunterbrecher) abwechselnd mit der Batterie und dann mit dem Galvanometer verbunden. Der dauernde Ausschlag der Nadel bez. seine Tangente (49) ist *cet. par.* der Kapazität proportional.



Je kleiner die letztere, desto rascher darf die Wippe spielen, ohne unvollkommene Ladung oder Entladung befürchten zu müssen. Die Kapazität der Zuleitungsdrähte muß aber ev. für sich bestimmt und abgerechnet werden.

2. Absolute Bestimmung. Aus dem bekannten Reduktionsfaktor  $\mathfrak{C}$  (64; 69) des Galvanometers, der el. Kraft der Batterie  $E$  und der Schwingungszahl  $N$  der Wippe (37a) erhält man die Kapazität in abs. Mafse, indem  $cEN$  offenbar gleich der mittleren Stromstärke ist, welche man aus dem Ausschlage  $e$  als  $\mathfrak{C} \cdot e$  berechnet. Einfacher aber ist es, auch hier die Batterie  $E$  durch das Galvanometer und einen großen Widerstand  $R$  zu schliessen. Mit den Bezeichnungen von III 5 hat man

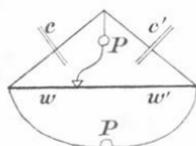
$$c = \frac{1}{N} \frac{1}{R+W} \cdot \frac{c}{e_0}$$

$c/e_0$  wird vorteilhaft nicht weit von 1 genommen, weil dann die Korrekturen auf die Tangente etc. unerheblich wirken. Über das Verfahren bei mangelndem großen  $R$  s. III 5.

3. Nullmethoden. Die kontinuierliche Folge von Entladungsströmen kann durch die eine Windung eines Differentialgalvanometers geschickt werden, während durch die andere der durch zugeschalteten Widerstand regulierte konstante Strom aus derselben Batterie fließt. Auch in einen Zweig der Wheatstone'schen Brücke kann man den Kondensator einschalten. Der Stromzweig, welcher den Kondensator nebst Unterbrecher enthält, wirkt wie ein Widerstand  $1/(Nc)$ .

Siemens, Pogg. Ann. 102, 66. 1857. Näheres über diese Methoden und über den Stimmgabel-Unterbrecher s. bei Klemenčič, Wien. Ber. 89, 298. 1884; Himstedt, Wied. Ann. 29, 560. 1886 u. 33, 1. 1888.

#### V. Mit dem Telephon.



1. Die beiden  $P$  bedeuten ein Induktorium und ein Telephon. Wenn das letztere schweigt oder als optisches Telephon keinen Ausschlag gibt, so ist, wie unter III 3,  $c:c' = w':w$  (Palaz).  $w$  und  $w'$  sollen induktionsfrei sein.

2. Über Vergleichung einer Kapazität mit einem Selbstinduktions-Koeffizienten s. 83a, 4. u. 5. Da der letztere konstanter als die elektrostatische Kapazität ist, kann diese Methode vorteilhaft sein.

Siehe über andere Methoden auch Heydweiller, El. Messungen S. 202 ff.

#### Kalibrirung eines Mefs-Kondensators von veränderlicher Kapazität (Nernst).

Einen solchen Kondensator ( $K$ ) kann man herstellen, indem man in die Luftschicht eines Platten-Kondensators eine mit einer Längenteilung versehene (Glas-)Platte von höherer Dielektricitätskonstante (86a) mehr oder weniger tief einschiebt. Zur Kalibrirung dient ein ähnlicher Hilfskondensator ( $H$ ) und ein kleiner Kondensator von konstanter Kapazität  $c$ , den man ab- oder zuschalten kann.

Man stellt  $K$  und  $H$  auf Gleichheit ein (s. z. B. oben Nr. V)

und liest  $K$  ab. Dann fügt man zu  $H$  die Kapazität  $c$ , stellt  $K$  wieder ein und liest ab. Nun entfernt man  $c$ , stellt zunächst  $H$  wieder ein, fügt dann  $c$  abermals zu  $H$ , verstellt  $K$  u. s. w. Den Verschiebungen von  $K$  entspricht jedesmal ein konstanter Zuwachs der Kapazität. Eine Kurve oder Tabelle nimmt diese auf.

Nernst, Z. S. f. phys. Ch. 14, 639. 1894. Vgl. auch 86 a I.

## 86 a. Dielektricitätskonstante.

### I. Mit dem Kondensator.

Die Kapazität eines Kondensators ist *et. par.* der Dielektricitätskonstante oder dem specif. Induktionsvermögen  $D$  der isolirenden Zwischenschicht, des „Dielektricums“, proportional.  $D$  wird für Luft = 1 gesetzt. Ist also  $C_1$  die Kapazität mit Luft,  $C$  diejenige mit einem anderen Dielektricum von der D.-K.  $D$ , so ist  $D = C/C_1$ . Gase bezieht man auch wohl auf den leeren Raum als Einheit. Einige D.-Konstanten s. Tab. 27 c.

Eine D.-Konstante wird also gemessen durch das Verhältnis zweier Kapacitäten (86). Die Auswahl der Methoden ist wegen der Leitung der Dielektrica beschränkt. Auf die hieraus entstehenden Fehler hat man hauptsächlich zu achten. Man verringert dieselben durch raschen Wechsel der Ladung und Entladung.

Die Proportionalität zwischen Kapazität und D.-K. ist daran geknüpft, daß die Kraftlinien ganz durch das Dielektricum gehen. Cylinder-Kondensatoren, deren äußere Belegung abgeleitet wird, lassen diese Bedingung besser erfüllen als Platten-Kondensatoren.

Die Kapacitäten der Zuleitungen sind ev. abzuziehen.

### Vollkommene Isolatoren.

Nach den Methoden in 86.

Flüssigkeiten. Man wird den Versuchskondensator, einmal Luft, das andere Mal die Flüssigkeit enthaltend, mit einem zweiten, konstanten Kondensator von ähnlicher Kapazität vergleichen. Um die obige Bedingung zu erfüllen, kann man nötigenfalls den Kondensator ganz in die Flüssigkeit untertauchen. Zur Messung eignet sich die Methode von Siemens (86 IV 1), besonders auch Wechselstrom und Telephon (86 V 1).

Gase verlangen, da ihre D.-K. von 1 wenig verschieden ist, eine Nullmethode: etwa mit dem Elektrometer durch Gegenstellung (86 II 2) oder mit Galvanometer und Wippe (86 IV 3).

Tropfbare Flüssigkeiten s. u. A. bei Silow, Pogg. Ann 158, 306. 1876; Palaz, J. de phys. (2) 5, 370. 1885. Über Gase und Dämpfe: Klemenčić, Wien. Ber. 91, 712. 1885; Lebedew, l. c.

Feste Körper kann man, wenn sie schmelzbar sind, wie Flüssigkeiten behandeln, indem man sie um den eingetauchten Kondensator erstarren läßt. Oder man bringt sie in einen Plattenkondensator als reichlich breitere planparallele Scheiben. Bedeutet  $a$  den Plattenabstand des Kondensators (klein gegen den Radius),  $c_0$  die Kapazität mit Luft,  $c$  die Kapazität mit eingeschobenem Körper von der Dicke  $d$  (18), so ist

$$\frac{1}{D} = 1 - \frac{a}{d} \frac{c - c_0}{c}.$$

Beweis. Es ist  $c_0 = \frac{1}{4} r^2/a$  (86 I). Die Scheibe des Dielektricum wirkt wie eine Luftschicht von der Dicke  $d/D$ . Daneben ist noch eine Luftdicke  $a - d$ ; also  $c = \frac{1}{4} r^2/(a - d + d/D)$ . Durch Division fällt  $r$  heraus; s. Boltzmann, Pogg. Ann. 151, 482 u. 531. 1874.

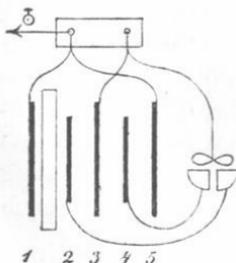
Je relativ kleiner der Plattenabstand, desto mehr verschwinden die Fehler, welche diesem Verfahren wegen des rückwärts verlaufenden Teiles der Kraftlinien anhaften.

Platten-Verschiebung. Man vermeidet die Messung von  $a$  und die Korrektion wegen der Zuleitungen, wenn die eine Kondensatorplatte parallel meßbar verschoben werden kann. Nach Einbringen der festen Platte sei eine Abstandsvermehrung um  $e$  nötig, um die frühere Kapazität herzustellen. Dann ist

$$D = d/(d - e).$$

Vgl. obigen Beweis.

Auch auf Flüssigkeiten, welche man in ein zwischen den Platten stehendes plan-paralleles Gefäß eingießt, ist die Methode anwendbar.



Zur Prüfung der gleichen Kapazität ist eine Nullmethode am bequemsten. Man kann hierzu (Gordon, Phil. Trans. 1879, 417) fünf äquidistante Kondensatorplatten benutzen, von denen (Nr. 1) verschiebbar ist. 1 und 5 sind abgeleitet. 3 ist mit einem Pol eines Induktionsapparates verbunden, dessen anderer Pol abgeleitet ist, sowie mit der Nadel eines Elektrometers. Die Schaltung des letzteren entspricht dem Dynamometer in der Wheatstone'schen Brücke Fig. S. 334. Ist

Nr. 1 so eingestellt, daß die Nadel ruhig bleibt, so verhalten sich die Kapacitäten  $(1,2):(2,3) = (4,5):(3,4)$ . Die Einstellung wird mit und ohne dielektrische Platte gemacht; die Verschiebung ist  $= e$ . Je größer  $D$ , desto empfindlicher wirken Einstellungs-Fehler.

An Stelle des Elektrometers kann man ein Telephon anwenden (Winkelmann).

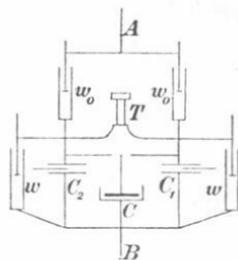
Über Anwendung von nur 3 Platten s. Winkelmann, Wied. Ann. 38, 161. 1889; vgl. jedoch dazu: Cohn, ib. 46, 135. 1892. Über Anwendung des Differentialinduktors: Elsas, ib. 44, 654. 1891.

### Unvollkommenere Isolatoren.

Die Resultate der obigen Methoden können schon durch Spuren von Leitung erheblich gefälscht werden.

Durch Kompensation des Leitvermögens (Nernst).

$C$  ist der Versuchskondensator, bestehend aus einer Metallplatte von konstanter Stellung zu dem Boden eines abgeleiteten Metallgefäßes, welches entweder mit Luft oder mit der zu untersuchenden Flüssigkeit oder endlich mit einer Flüssigkeit von bekannter D.-K.  $D_0$  (Tab. 24 b) gefüllt wird.  $C_1$  ist der Vergleichs-Meßkondensator aus zwei Metallplatten mit einschiebbarer Glasplatte (86, S. 414).  $C_2$  ist ein konstanter Hilfskondensator.  $T$  ist ein Telephon. Bei  $A$  und  $B$  werden Wechselströme eines kleinen Induktoriums eingeführt.



$w_0$  und  $w'_0$  bedeuten zwei gleiche, gleichgestaltete Widerstände, bei Nernst Flüssigkeitssäulen mit Elektroden. Die Gleichheit wird daran erkannt, daß, wenn das Telephon schweigt, Vertauschung der beiden  $w_0$  keine Änderung bewirkt.  $w$  und  $w$  sind zwei veränderliche Flüssigkeitswiderstände mit verschiebbaren Elektroden, die nur bei der Untersuchung schlecht isolirender Körper nötig sind. Über die Flüssigkeit in  $w$  s. 72, S. 338.

Man schaltet  $C$  luftgefüllt zu  $C_2$  und stellt  $C_1$  ein. Man schaltet dann  $C$  zu  $C_1$  und verstellt  $C_1$  wieder bis zum Schweigen des Telephons. Diese Verschiebung mißt das Doppelte der Kapazität  $c$  des Kondensators einschl. der Zuleitungen.

Ebenso wird die Kapazität  $c_f$  nach Beschickung des Troges

mit der Flüssigkeit von der unbekanntem D.-K.  $D$  gemessen. Hat diese Flüssigkeit ein Leitvermögen, so ist das Telephon zunächst nicht zum Schweigen zu bringen. Man schaltet dann auf der Gegenseite durch Probiren eine solche Länge von  $w$  aus, daß das Tonminimum wieder gut ist. Ein Leitvermögen wie dasjenige eines guten destillirten Wassers ist so noch zu kompensiren.

Gerade so sei nach Füllung des Troges mit der Aichflüssigkeit  $D_0$  die Kapazität  $= c_0$  gefunden.

$D$  ergibt sich dann aus der Formel

$$D - 1 = (D_0 - 1) \cdot (c_j - c) / (c_0 - c),$$

worin man für die  $c$  die entsprechenden (ev. nach S. 414 korrigirten) Verschiebungen in  $C_1$  setzt.

Folgt aus  $c = \gamma \cdot 1 + \delta$ ,  $c_j = \gamma \cdot D + \delta$ ,  $c_0 = \gamma \cdot D_0 + \delta$ .

Erdleitung sowie eine Berührung mit der Hand ist zu vermeiden, Symmetrie und Konstanz der Zuleitungen zu beachten.

Je nach der Größe der D.-K. kann man Tröge von verschiedenen großer Luftkapazität anwenden.

Über direkte absolute Messung, über Fehlerquellen und Vorsichtsmaßregeln vgl. Nernst, Z. S. f. phys. Ch. 14, 622. 1894.

### Durch elektrische Schwingungen.

Wenn ein Kondensator  $c$  sich auf einem Wege vom Selbstinduktionskoeffizienten  $\Pi$  (83a) entlädt, so treten zwischen den Kondensatorplatten elektrische Schwingungen von der Schwingungsdauer  $\tau = \pi \sqrt{c\Pi}$  auf.  $\tau$  ist also *cet. par.* proportional  $\sqrt{c}$ . Über Hervorbringung, Messung und Verwendung der Schwingungen zur Ermittlung von  $c$  und  $D$  s. Schiller, Pogg. Ann. 152, 535. 1874.

### Mit dem Helmholtz'schen Pendelunterbrecher (Cohn und Arons).

Die Methode beruht auf der Messung des zeitlichen Verlaufes der Ladung von Kondensatoren. S. Wied. Ann. 28, 454. 1886.

### II. Durch Kraftwirkungen.

Die gegenseitige Kraftwirkung zweier auf festem Potential erhaltener Leiter ist proportional der Diel.-Konstante des Mittels, in welchem dieselben sich befinden.

An einem passend gebauten Quadrantelektrometer in Doppelschaltung (84a, II) beobachtet man die durch ein konstantes Potential (Daniell, Akkumulatoren) hervorgebrachten Ausschläge bei Füllung mit Luft bez. mit der Flüssigkeit. Die auf Pro-

portionalität mit dem Quadrat der Potentialdifferenz korrigierten Ausschläge (84c) stehen im Verhältnis der D-Konstanten. Die Nadel ist an einem feinen Metalldraht aufgehängt, der zugleich als Zuleitung dient (Silow).

Bei Spuren von Leitung stört die Polarisierung; daher ladet man besser mit Wechselströmen (72; Induktionsapparat, rotirender Kommutator) und kann dann selbst Körper wie Alkohol, Wasser, Lösungen bis  $k = 10^{-9}$  messen (Cohn u. Arons). Zur Eliminierung der Schwankungen des Potentials dient ein dem ersten parallel geschaltetes, gleichzeitig abgelesenes, gewöhnliches Elektrometer. Flüssigkeitsströmungen aus Temperaturschwankungen, Verdampfung etc. sind sorgfältig zu vermeiden.

Silow, Pogg. Ann. 156, 389. 1875; Cohn u. Arons, Wied. Ann. 33, 13. 1888; Tereschin, ib. 36, 792. 1889; Heerwagen, ib. 48, 35. 1892; Smale, ib. 57, 215. 1896.

### III. Aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen.

Nach Maxwell ist die D-Konstante gleich dem Quadrate des Lichtbrechungsverhältnisses für unendlich lange Wellen. Die optische Extrapolierung des letzteren hat sich im allgemeinen als unzulässig erwiesen. Die Hertz'schen elektrischen Wellen von Meter-Länge genügen aber der Anforderung. Die Messung ihrer Brechung oder Geschwindigkeit in verschiedenen Mitteln ergibt also ebenfalls die D-K.

Arons u. Rubens, Wied. Ann. 42, 581. 1891; 44, 206. 1891; Cohn ib. 45, 370. 1892; Cohn u. Zeemann, ib. 57, 15. 1896.

### 86 b. Bestimmung sehr großer Widerstände.

Zur Messung sehr großer Widerstände, z. B. auch der Isolationswiderstände von Kabeln oder von Isolirmaterial in Plattenform, welchem man weiche Elektroden anschmiegt, sind oft besondere Methoden notwendig. Dabei ist praktisch zu beachten, daß die angewandten starken Batterien, falls mit den großen Widerständen erhebliche Kapacitäten verbunden sind, recht konstant sein müssen, wenn nicht die zur Beobachtung kommenden schwachen Ströme von Ladungs- und Entladungsströmen gestört werden sollen. Wegen der Kapacitäten darf man oft nicht mit kurzem Stromschluß arbeiten.

1. Direkte Messung. Wenn genügend empfindliche Galvanometer, bez. starke Säulen sowie große Vergleichswiderstände zur Verfügung stehen, so können die Methoden 70 bis 71b angewendet werden. Insbesondere die Brückenschaltung (71b I) kann, wenn man die Zweigleitungen etwa im Verhältnis 1:1000 nimmt, für Widerstände bis zu 10 Millionen dienen, falls man Vergleichswiderstände bis 10000 besitzt.

2. Durch Teilung einer Batterie. Dieses Verfahren ist meistens am einfachsten. Eine Batterie gebe durch den zu messenden Widerstand  $W$  und ein Galvanometer vom Widerstand  $\gamma$  geschlossen den Ausschlag  $e$ . Der  $n^{\text{te}}$  Teil der Batterie, durch den bekannten Widerstand  $R$  ebenso geschlossen, gebe  $e'$ . Dann ist

$$W = (nR + n\gamma + w)e'/e - (\gamma + w).$$

Teilt man die Batterie so, daß  $e$  ungefähr  $= e'$  wird, so fällt  $w$  heraus und es wird

$$W = n(R + \gamma)e'/e - \gamma.$$

$\gamma$  wird meistens nur genähert bekannt zu sein brauchen.

Zum Zwecke genauer Messung bestimmt man  $e'$  für alle  $n$  Teile der Batterie und nimmt das Mittel.

3. Aus Spannung und Stromstärke. Ist  $E$  die Spannung einer Säule in Volt,  $\mathfrak{C}$  der Reduktionsfaktor des Ausschlages eines Spiegelgalvanometers auf Am, so zeigt der Ausschlag  $e$  des Galvanometers den Gesamtwiderstand der Leitung

$$W = 1/e \cdot E/\mathfrak{C} \text{ Ohm.}$$

4. Mit einer Abzweigung am Galvanometer. Eine Säule, durch den zu messenden Widerstand  $w$  und das Galvanometer vom Widerstande  $\gamma$  ohne Abzweigung geschlossen, gebe den Ausschlag  $e$ . Dieselbe Säule, durch den bekannten großen Widerstand  $R$  und das durch den Widerstand  $z$  abgezweigte Galvanometer geschlossen, gebe  $e'$ . Ist  $w_0$  der Widerstand der Säule, so hat man genau

$$w = e'/e \cdot [(R + w_0)(z + \gamma)/z + \gamma] - \gamma - w_0.$$

Bei sehr großen Widerständen kann  $\gamma$  und  $w_0$  meistens gegen  $R$  und  $w$  vernachlässigt werden. Dann ist einfach

$$w = e'/e \cdot R(z + \gamma)/z.$$

5. Mit dem Kondensator (Siemens). Widerstände von sogenannten „Nichtleitern“, z. B. von verschiedenen Sorten Gutta-percha u. dgl., sind unter Umständen für galvanometrische Methoden

zu groß. Alsdann läßt sich die Ladungs- oder Entladungszeit eines Kondensators benutzen. Sinkt das Potential (84a) eines Kondensators von der Kapazität  $c$  (86) in der Zeit  $t$  von dem Werte  $V_1$  auf  $V_2$ , so ist der Widerstand des Entladungsweges

$$W = \frac{1}{c} \frac{t}{\log V_1 - \log V_2}.$$

Findet man hiernach den Wert  $W$ , wenn der Kondensator für sich allein steht, und dann  $W'$ , wenn die beiden Belegungen durch den zu bestimmenden Widerstand  $w$  mit einander verbunden sind, so beträgt der letztere allein (63, S. 282)

$$w = W W' / (W - W').$$

Ist  $c$  in absolutem Maße (Farad) gegeben, so erhält man den Widerstand in ebensolchem Maße (Ohm), wenn man natürliche Logarithmen ( $= 2,303 \cdot \log$  brigg) anwendet. Das Maß von  $V$  ist gleichgiltig.

Beweis. Dem Potentiale  $V$  entspricht die Ladungsmenge  $Q = c \cdot V$ . In dem Zeitelement  $dt$  geht hiervon verloren  $dt \cdot V/W = -dQ$  oder  $= -c dV$ . Hieraus folgt durch Integration der obige Ausdruck.

Umgekehrt kann man aus bekanntem  $W$  und der Entladungsdauer die Kapazität des Kondensators bestimmen (Siemens & Halske).

Verfeinerungen der Methode und Formeln für den Verlauf der Entladung s. bei Klemenčič, Wien. Ber. 93, 470. 1886.