

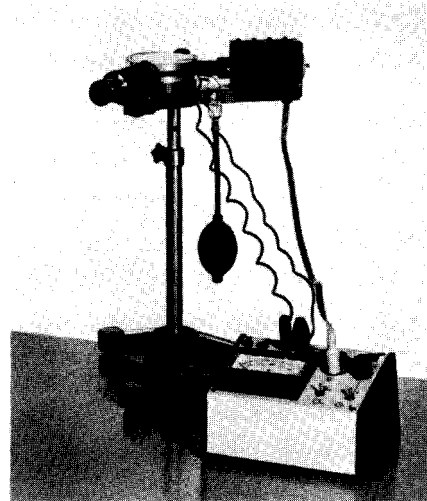
§ 20 Der Millikan-Versuch

1. Beim Berechnen der Elementarladung $e = F/N_A$ aus der Faraday-Konstanten F und der Avogadro-Konstanten N_A nahmen wir an, daß alle Elementarladungen e unter sich gleich groß sind. Der Wert $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ könnte aber auch nur ein *Mittelwert* sein, um den die einzelnen Ionenladungen streuen. Ein einfaches Beispiel verdeutliche dies: 20 Äpfel wiegen 2,0 kg. Daß jeder Apfel die Masse 100 g habe, kann man nur dann behaupten, wenn man jeden einzeln gewogen hat; andernfalls gibt der Wert 100 g nur den Mittelwert an. Wir müssen also die Ladung einzelner geladener Teilchen bestimmen. Das hierzu geeignete Experiment dachte sich *Ehrenhaft* (Wiener Physiker) aus; der Amerikaner

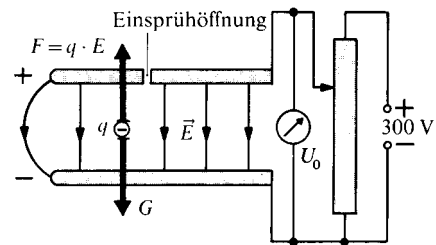
Millikan führte es ab 1909 mit großer Präzision durch. Es hat mit der Elektrolyse nichts zu tun und ist von ihren Gesetzen unabhängig:

Versuch 50: Mit einem Mikroskop betrachtet man den Raum zwischen zwei horizontalen Kondensatorplatten, der durch ein Gehäuse vor Luftzug geschützt ist (Abb. 70.1). Im Mikroskop erkennt man Strichmarken, deren Abstand Δs genau bekannt ist (etwa durch Ausmessen der Strecke 1 mm, die auf einer Glasplatte in 100 gleiche Teile geteilt wurde). Dann bläst man durch eine Öffnung kleine Öltröpfchen aus einem Zerstäuber zwischen die Platten. Man sieht sie bei seitlicher Beleuchtung als helle Lichtpunkte nach unten sinken (da das Mikroskop umkehrt, scheinen sie nach oben zu wandern). Nun legt man eine Spannung zwischen die Platten (untere zum Beispiel negativ geladen, Abb. 71.1). Dann sinkt ein Teil der Tröpfchen unbeeinflusst weiter, ist also ungeladen. Ein Teil steigt zur oberen Platte auf, ist also negativ geladen. Die positiv geladenen sinken noch schneller als die ungeladenen. Die Ladung rührt daher, daß beim Zerstäuben des Öls das eine Tröpfchen einige Elektronen zuviel, das andere einige zu wenig erhält. Man beobachtet nun ein und dasselbe negativ geladene Tröpfchen über längere Zeit genau und ändert die Spannung U_0 am Potentiometer (in Abb. 71.1 rechts) solange, bis es *schwebt*. Dann besteht am Tröpfchen Gleichgewicht zwischen der nach oben gerichteten elektrischen Kraft $F = q \cdot E$, die seine Ladung q im Feld der Stärke $E = U_0/d$ erfährt, und der nach unten gerichteten Gewichtskraft G (d ist der Plattenabstand). Es gilt: $q \cdot E = G$. Die Hauptschwierigkeit dieses an sich einfach zu durchschauenden Versuchs besteht darin, die Gewichtskraft G zu ermitteln. Auch unter einem starken Mikroskop kann man den Durchmesser des Tröpfchens nicht messen, G also nicht unmittelbar bestimmen. Vielmehr muß man davon ausgehen, daß ohne ein elektrisches Feld ein Tröpfchen in Luft um so schneller sinkt, je schwerer es ist (man vergleiche Regen- mit Nebeltröpfchen; Mechanikband Seite 59). Der Zusammenhang zwischen der Sinkgeschwindigkeit v_0 ohne Feld und der Gewichtskraft G ist in Abb. 71.2 für Tröpfchen aus Öl der Dichte $\rho = 0,973 \text{ g/cm}^3$ aufgetragen. Man schaltet nach Messung der Schwebespannung U_0 das Feld ab und bestimmt die Sinkgeschwindigkeit v_0 längs der Meßstrecke Δs mit der Stoppuhr; die Gewichtskraft G entnimmt man der Abb. 71.2. Für die Ladung

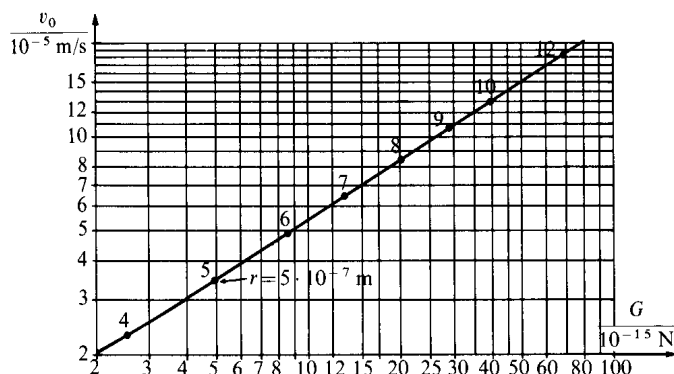
$$q = \frac{G}{E} = \frac{G \cdot d}{U_0} \quad (71.1)$$



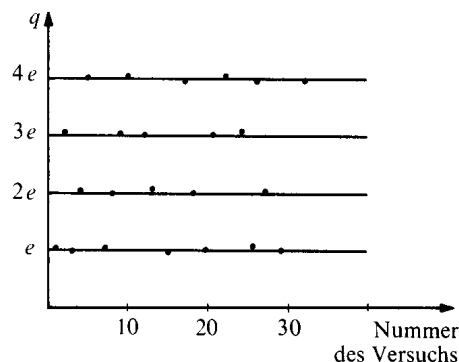
70.1 Gerät zum Millikan-Versuch (Fa. Leybold)



71.1 Schwebekondensator nach Millikan; Rechts das Potentiometer zum Regeln der Schwebespannung U_0



71.2 Sinkgeschwindigkeit v_0 von Öltröpfchen in Luft als Funktion des Gewichts G ; r bedeutet den Tröpfchenradius.



71.3 Streuung zahlreicher Meßwerte für die Tröpfchenladung q um $n \cdot e$

ergeben sich auch bei Wiederholung an vielen Tausenden solcher Tröpfchen immer nur kleine ganzzahlige Vielfache der in Gl. 68.1 berechneten Elementarladung e , nämlich e selbst oder $2e$, $3e$ usw. Zwischenwerte wie $0,7e$; $3,4e$ usw. werden auch hier nicht beobachtet (Abb. 71.3). Man beachte, daß Abb. 71.2 einen kontinuierlichen Zusammenhang zwischen v_0 und G liefert.

Beispiel: Die Strecke $\Delta s = 2,50$ mm wird in $\Delta t = 35,0$ s durchfallen; also ist $v_0 = \Delta s / \Delta t = 7,14 \cdot 10^{-5}$ m/s. Abb. 71.2 entnimmt man $G = 15,8 \cdot 10^{-15}$ N. Aus der Schwebespannung $U_0 = 255$ V und dem Plattenabstand $d = 5,0$ mm folgt nach Gl. 71.1 $q = 3,1 \cdot 10^{-19}$ C, das heißt 2 Elementarladungen.

2. Wir wollen nun klären, wie die Abb. 71.2 zustandekommt: Die Tröpfchen fallen in der Luft so langsam, daß sie keine Wirbel hinterlassen (im Gegensatz zum Luftwiderstand bei schnellen Bewegungen; Mechanikband Seite 27). Dann ist die Widerstandskraft F_L nach Stokes (1819 bis 1903) dem Kugelradius r und der Sinkgeschwindigkeit v_0 proportional:

$$F_L = 6\pi\eta \cdot r \cdot v_0 \quad (\text{Stokessches Gesetz}). \quad (72.1)$$

Der Faktor η heißt *Zähigkeit* und ist eine temperaturabhängige Materialkonstante des Stoffs, in dem die Tröpfchen fallen. η hat für Luft von 22°C den vom Druck unabhängigen Wert $1,828 \cdot 10^{-5}$ N s/m² und nimmt bei 1 K Temperaturzunahme um etwa 0,25 % zu. Dieses *Stokessche Gesetz* können wir hier weder experimentell noch theoretisch begründen, benutzen es aber auf Seite 75 bei der Bewegung von Ionen in Wasser.

Wenn man in *Versuch 50* die Schwebespannung U_0 wegnimmt, so wird das Tröpfchen zunächst von seiner Gewichtskraft G beschleunigt; dabei steigt in einer vernachlässigbar kurzen Zeitspanne die Geschwindigkeit v soweit an, bis die Luftwiderstandskraft F_L der Gewichtskraft $G = V \cdot \gamma = 4\pi r^3 \cdot \varrho \cdot g/3$ das Gleichgewicht hält: $F_L = G$. Dabei ist ϱ die Dichte des Öls, aus dem das Tröpfchen besteht. Für die dabei erreichte konstante Sinkgeschwindigkeit v_0 (siehe Mechanikband Seite 59) gilt:

$$F_L = 6\pi\eta \cdot r \cdot v_0 = G \quad \text{oder} \quad v_0 = \frac{G}{6\pi\eta \cdot r}. \quad (72.2)$$

In Abb. 71.2 ist v_0 über G für verschiedene Werte von r aufgetragen, und zwar für Öl der Dichte $\varrho = 0,973$ g/cm³. — Wenn der Tröpfchenradius r in die Größenordnung der mittleren freien Weglänge \bar{l} der Luftmoleküle (10^{-7} m) absinkt, gilt Gl. 72.1 nicht mehr genau. Zur Korrektur ersetzt man η durch $\eta' = \eta / (1 + 0,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}/r)$. Dies wurde in Abb. 71.2 berücksichtigt.