

Die Elementarladung – Der Millikan-Versuch

Die Ladung des Protons ist $+e$, die des Elektrons $-e$, wobei die Einheit e Elementarladung genannt wird.

Im Chemieunterricht lernt man, dass 1 mol ($6,02 \cdot 10^{23}$) Elementarladungen 96500 C sind (2. Faraday-Gesetz).

Daraus kann man die Elementarladung ermitteln: $e = \frac{96500C}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,6 \cdot 10^{-19} C$. Die so bestimmte

Ladung könnte jedoch ein Mittelwert sein, um den die einzelnen Ladungen streuen (Z.B. könnte es Elektronen bzw. Protonen mit $0,5e$ und $1,5e$ geben).

Der Amerikaner Robert A. Millikan konnte 1909 nach langwierigen Experimenten nachweisen, dass ein Elektron die Ladung $-e$ hat und dass in der Natur positive wie negative Ladungsträger nur als ganzzahlige Vielfache der Elementarladung auftreten. Er erhielt für diesen Nachweis 1923 den Nobelpreis.

Versuchsaufbau und Versuchsbeschreibung

In einem vor Luftzug geschützten Gehäuse befinden sich zwei horizontal angeordnete Kondensatorplatten. In den luftgefüllten Raum zwischen diesen Platten sprüht man kleine feinerstäubte Öltröpfchen. Bei seitlicher Beleuchtung werden diese unter einem Mikroskop als helle Lichtpunkte sichtbar. Beim Zerstäuben erhalten die Tröpfchen positive oder negative Überschussladungen. Aufgrund der Schwerkraft sinken die Öltröpfchen nach unten. Legt man eine Spannung U_C zwischen die Platten (die untere sei negativ geladen), so sinken die ungeladenen Öltröpfchen unbeeinflusst weiter, die positiv geladenen Tröpfchen sinken schneller, die negativ geladenen steigen ab einer gewissen Spannung nach oben.

Beobachtet man nun die Bewegung eines negativ geladenen Öltröpfchens genauer und ändert die Spannung U_C , bis das Tröpfchen sich in der Schwebe befindet, so gleichen sich die nach oben gerichtete elektrische Feldkraft und die nach unten gerichtete Gewichtskraft aus. Regelt man dagegen die Spannung U_C auf Null, so sinkt das Öltröpfchen nach unten. Dabei führt es eine gleichförmige Bewegung aus, da es zu einem Gleichgewicht zwischen der Gewichtskraft und der von der Sinkgeschwindigkeit abhängigen Kraft F_R des Luftwiderstandes kommt (vergleiche Fallbewegung eines Fallschirmspringers).

Ist die Sinkgeschwindigkeit des Öltröpfchens gleich Null, so gilt:

$$F_{el} = F_G$$

$$\Rightarrow q \cdot E = F_G$$

$$\Rightarrow q \cdot \frac{U_C}{d} = F_G$$

$$\Rightarrow q = \frac{d \cdot F_G}{U_C}$$

(q ...Ladung des Öltröpfchens; F_G ...Gewichtskraft des Öltröpfchens; g ...Fallbeschleunigung; d ...Plattenabstand; U_C ...Spannung am Kondensator, wenn das Öltröpfchen sich in der Schwebe befindet)

Die Öltröpfchen sind leider so klein, dass ihre Masse und damit auch ihre Gewichtskraft nicht direkt gemessen werden kann. Geht man davon aus, dass die Tröpfchen kugelförmig sind, kann man die Masse über das Volumen und die Dichte von Öl bestimmen:

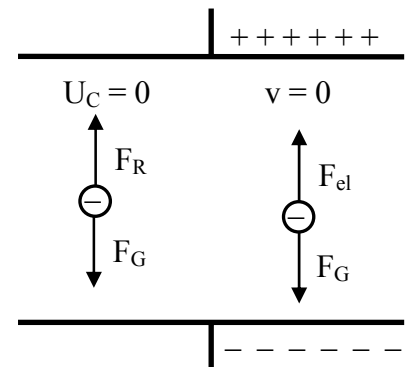
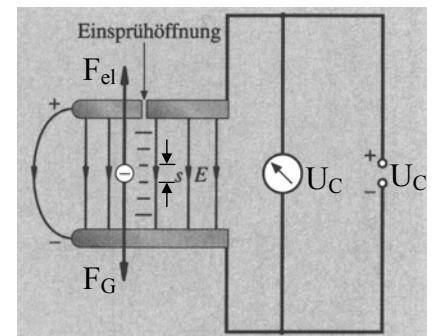
$$m = \rho \cdot V$$

$$\Rightarrow m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (2)$$

$$\Rightarrow F_G = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \quad (3)$$

Auch der Radius eines solchen kleinen Tröpfchens lässt sich nicht direkt messen. Deshalb berechnet man den Radius über die Sinkgeschwindigkeit bei $U_C = 0$.

Es gilt hier: $F_R = F_G$. (4)



(1)

Die Reibungskraft F_R des Luftwiderstandes kann mit dem Stokeschen Gesetz bestimmt werden:

$$F_R = 6\pi r \eta v \quad (5)$$

(r ...Radius des Tröpfchens; η ...Zähigkeit (Viskosität) der Luft; v ...Sinkgeschwindigkeit bei $U_C = 0$)

Damit ergibt sich für die Gewichtskraft: $6\pi r \eta v = F_G$ (6)

Mit (3) erhält man
$$r = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta v}{\rho g}} \quad (7)$$

Setzt man diesen Ausdruck für den Radius des Öltröpfchens wiederum in (3) ein, so gewinnt man eine Gleichung für die Gewichtskraft des Öltröpfchens, die vom Radius unabhängig ist und damit ergibt sich für die Ladung des Tröpfchens:

$$q = 9\sqrt{2}\pi \cdot d \sqrt{\eta^3} \frac{\sqrt{\rho}}{\rho} \frac{\sqrt{g}}{g} \cdot \frac{\sqrt{v^3}}{U_C} \quad (8)$$

Misst man die Spannung U_C , bei der das Öltröpfchen schwebt und die Sinkgeschwindigkeit bei ungeladenem Kondensator, so lässt sich mit (8) die Ladung des Öltröpfchens berechnen.

Bei der Ladungsmessung von mehreren Öltröpfchen wird man erkennen, dass nur ganzzahlige Vielfache der Elementarladung auftreten, nämlich e selbst oder $2e$, $3e$ usw.; Zwischenwerte wie z.B. $0,5e$, $0,7e$ oder $3,6e$ werden nicht beobachtet.

Vorbetrachtungen

1. Wie bestimmt man beim gegebenen Versuchsaufbau die Sinkgeschwindigkeit eines Öltröpfchens?
2. Warum sieht man durch das Mikroskop, dass sich bei $U_C = 0$ die Öltröpfchen nach oben bewegen?
3. Ein Öltröpfchen durchfällt bei $U_C = 0$ eine Strecke von 1,0666 mm in 7,49 s. Bei einer Spannung von 181 V schwebt das Tröpfchen. Wie groß ist die Sinkgeschwindigkeit, der Radius, die Gewichtskraft und die Ladung des Tröpfchens? Wie viel Elementarladungen sind dies?

$$(d = 6 \text{ mm}, \eta = 7,25 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}, \rho = 875,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$$

4. Leiten Sie die Gleichung (7) her. Benutzen Sie dazu die Gleichungen (3), (4) und (5). Begründen Sie die verwendeten Gleichungen (außer Gleichung (5)) und die einzelnen Schritte der Herleitung.
5. Bereiten Sie für die Versuchsdurchführung eine Messwerttabelle vor, in der folgende Spaltenköpfe vorkommen: Nummer der Messung, Vielfache von e , zu messende Zeit, zu messende Spannung.
6. Bereiten Sie für die Versuchsauswertung eine Tabelle vor, die folgende Spaltenköpfe enthält: Nummer der Messung, Weg, Sinkgeschwindigkeit, Radius, Gewichtskraft, Ladung, Vielfache der Elementarladung. Geben Sie die jeweils zu verwendende Gleichung an.

Zusatz 1 Leiten Sie die Gleichung (8) her.

Zusatz 2 Es gibt noch eine andere Messmethode mit Millikans Versuchsaufbau zur Bestimmung der Ladung eines Öltröpfchens. Hier wird die Polarität der Spannung U_C geändert und es werden die jeweiligen Geschwindigkeiten des Öltröpfchens gemessen. Die Ladung errechnet man dann mit der Gleichung

$$q = \frac{9}{2} \pi \sqrt{\frac{\eta^3}{\rho g}} \frac{d}{U_C} (v_1 + v_2) \sqrt{v_1 - v_2} .$$

Leiten Sie diese Gleichung her und machen Sie sich mit dem Messverfahren vertraut.

Versuchsdurchführung und Auswertung

1. Bestimmen Sie für mindestens 5 Öltröpfchen den Radius, die Gewichtskraft und die Ladung.
2. Formulieren Sie zusammenfassend das Ergebnis Ihrer Messungen.
3. Führen Sie eine Fehlerbetrachtung durch.

Zusatz Bestimmen Sie für ein oder mehrere Öltröpfchen die Ladung nach der in Zusatz 2 angedeuteten Messmethode.

Literaturhinweise

- Kuhn: Physik 2, S. 175; Westermann 2000
- Grehn, Krause: Metzler Physik, S.210f; Schroedel 1998
- <http://www.physik-schule.de>
(In dem Menü **Physik-Links** finden Sie eine Linksammlung zum Millikan-Versuch. Unter anderem ist auch ein Link auf die von uns verwendete virtuelle Versuchsanlage enthalten.)