
1.1.10 Quantelung der Elementarladung; Millikan-Versuch und Elementarladung; Ladung als Erhaltungsgröße

Die Faradayschen Gesetze der Elektrolyse

Nach einer Modellvorstellung findet beim chemischen Lösen von Stoffen in Lösungsmitteln eine Aufspaltung in positive und negative Ionen statt (Dissoziation). Beim Anlegen einer Spannung an die Elektroden wandern die negativen Ionen zum Pluspol, die positiven zum Minuspol (Elektrolyse). Der Ladungstransport ist also mit einem Materietransport verbunden.

Faraday erkannte folgende Gesetze für die sog. Elektrolyse:

1. Faraday-Gesetz: Die von einem bestimmten Stoff abgeschiedene Masse m ist der durch den Elektrolyten geflossenen Ladung Q direkt proportional:
 $m \sim Q$.

Anmerkung: Andere Größen wie Temperatur, Konzentration, Stromstärke, Widerstand und Elektrodenbeschaffenheit sind ohne Einfluss. Damit besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Zahl der transportierten Ionen und der Ladungsmenge, die sie mit sich tragen.

2. Faraday-Gesetz: Bei Abscheidung von 1 mol eines z -wertigen Stoffes wird an einer Elektrode die Ladung $Q = z \cdot 96494 \text{ C}$ abgegeben oder aufgenommen.

Anmerkung: In der Literatur heißt die daraus abgeleitete Konstante $F = 96494 \text{ C/mol}$ Faraday-Konstante.

Unter der Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der transportierten Ladung auf die Ionen einer Sorte ergibt sich für die Ladung etwa eines einwertigen Ions der Wert

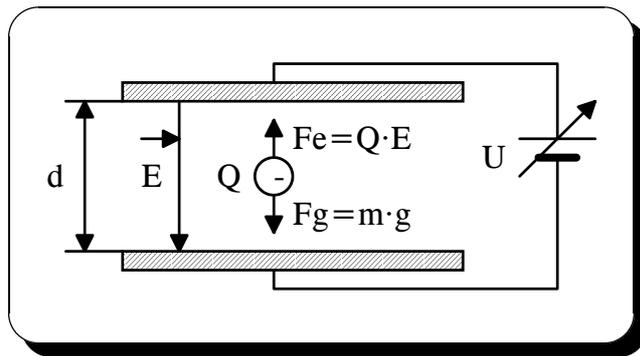
$$e = \frac{96494 \frac{\text{C}}{\text{mol}}}{6,0225 \cdot 10^{26} \frac{1}{\text{mol}}} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ As.}$$

Dieser Wert lässt sich für beliebige einwertige Ionen bestätigen. Dies lässt vermuten, dass die elektrischen Ladungen nur in ganzzahligen Vielfachen der sog. Elementarladung e auftreten.

Der Millikan-Versuch

Aufgrund der experimentellen Befunde von Faraday vermutete der deutsche Mediziner und Physiker Hermann von Helmholtz (1821 -1894) bereits 1881, dass es ein kleinstes Elementarquantum der elektrischen Ladungen geben müsse. Der experimentelle Nachweis für den quantenhaften Charakter der elektrischen Ladung gelang Robert Millikan (amerik. Physiker, 1868 - 1953, Nobelpreis 1923).

Versuch:



Zwischen die Platten eines Kondensators werden Öltröpfchen eingeblasen, die teilweise elektrisch geladen sind. Die Tröpfchen werden seitlich beleuchtet und mit dem Mikroskop beobachtet.

Der eigentliche Versuch besteht aus zwei Messungen:

1. Messung: Die Spannung am Kondensator wird so eingestellt, dass ein ins Auge gefasstes Teilchen gerade schwebt. Dies ist der Fall, wenn elektrische Feldkraft und Gewicht dem Betrag nach gleich sind:

$$m \cdot g = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d}.$$

Q kann daraus noch nicht berechnet werden, da die Masse eines Öltröpfchens wegen seiner geringen Ausdehnung nicht bestimmt werden kann. Es ist daher eine zweite Messung notwendig:

2. Messung: Nach dem Abschalten der Spannung fallen die Tröpfchen nach unten. Im Vakuum würde ein Tropfen eine gleichförmig-beschleunigte Bewegung vollführen; in Luft verhält er sich dagegen wie eine in Honig eintauchende Stahlkugel, d. h. er wird nur so lange beschleunigt, bis die die Beschleunigung hervorrufende Gewichtskraft durch die so genannte Stoische Reibungskraft gerade kompensiert wird, die für einen kugelförmigen, in ein Medium der Zähigkeit η eintauchenden Gegenstand vom Radius r und der Geschwindigkeit v durch die Gleichung

$$F_{\text{Stokes}} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

beschrieben wird. Die Beschleunigungszeit bis zum Erreichen der Endgeschwindigkeit kann vernachlässigt werden, so dass als zweite Gleichung

$$m \cdot g = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

gilt.

Berechnung der Tröpfchenladung: Unter der Annahme einer kugelförmigen Gestalt des beobachteten Tröpfchens gilt

$$m = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot \rho.$$

Damit nimmt die erste Gleichung die Form

$$Q_p = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{d}{U}$$

an. Die zweite Gleichung lässt sich nach r auflösen:

$$\frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot \rho \cdot g = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v.$$

Daraus folgt

$$r^2 = \frac{9 \cdot \eta \cdot v}{2 \cdot \rho \cdot g} \quad \text{bzw.} \quad r = 3 \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot v}{2 \cdot \rho \cdot g}}.$$

Dieser Term für r wird in die obige Gleichung eingesetzt; nach einigen Umrechnung erhält man schließlich

$$Q_p = C \cdot \frac{v^{\frac{3}{2}}}{U} \text{ mit } U = 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg m}^{\frac{1}{2}} \text{ s}^{-\frac{1}{2}} .$$

Bei der verwendeten Apparatur haben die Versuchsparameter die Werte $\eta = 1,828 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$, $d = 6\text{mm}$, $\rho_{\text{Öl}} = 875 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Ferner ist bei der Berechnung der Geschwindigkeit v über den Fallweg s die Objektivvergrößerung zu berücksichtigen, so dass für den Fallweg gilt:
 $s = \text{Anzahl der Strichmarken im Objektiv} \cdot 10^{-4} \text{ m} : 1,875$.

Auswertung: Die Messwerte sind Vielfache von $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$, auch wenn man den Kondensator umpolt und dadurch entgegengesetzt geladene Teilchen untersucht.

Zusammenfassung: Positive wie negative Ladungen treten nur als ganzzahlige Vielfache der Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ auf. Die Ladung des Elektrons ist $-e$.