
Der Mann, der den Nebel lichtete

Das Elektron gehörte bereits Anfang des vergangenen Jahrhunderts zum Weltbild der meisten Physiker - seine Ladungsmenge war indes unbekannt. Mit einer verblüffend einfachen Apparatur bestimmte Robert Millikan 1909 den genauen Wert. Und entdeckte damit eine der fundamentalen Konstanten des Universums

Millikan hat vor 100 Jahren die kleinste in der Natur vorkommende elektrische Ladungsmenge erstmals präzise gemessen: die Elementarladung. Sie ist eine universelle Konstante - jedes Elektron trägt eine negative und jedes Proton eine positive Elementarladung.

*Mit einem völlig anderen Verfahren gelang es dem amerikanischen Physiker ROBERT ANDREWS MILLIKAN (1868-1953) in den Jahren 1909 bis 1913 erstmals, die Elementarladung e relativ genau zu bestimmen. Er nutzte dazu die **Tröpfchenmethode**, der Versuch wird heute als **MILLIKAN-Versuch** (oder auch **Öltröpfchenversuch**) bzw. **MILLIKAN-EXPERIMENT** bezeichnet. MILLIKAN erhielt für die Präzisionsmessung der Elementarladung 1923 den Nobelpreis für Physik.*

Zuvor war gar nicht klar, ob es überhaupt so etwas wie eine kleinste Ladung gibt.

Mit dem im folgenden beschriebenen Experiment konnte Robert Millikan nachweisen, dass es eine kleinste Ladung - die sog. Elementarladung - gibt, und er konnte diese als erster relativ genau bestimmen.

Unglaublich klein

In seinem Buch "Das Elektron" von 1917 veranschaulichte Millikan seinen Zeitgenossen, wie unglaublich klein die Elementarladung ist - vielleicht, um ihnen klarzumachen, welche Meisterleistung er vollbracht hatte:

"Angenommen, jeder Einwohner von Chicago, insgesamt also zweieinhalb Millionen Menschen, würde jede Sekunde zwei Elektronen zählen. Wie lange würden die Chicagoer brauchen, um auf die Anzahl von Elektronen zu kommen, die in einer einzigen Sekunde durch den Draht einer elektrischen Lampe fließen?" Er gab die Antwort selbst: "20 000 Jahre!"

Später schrieb er rückblickend: "Jeder interessierte sich für die

Elementarladung, denn sie ist wahrscheinlich die **fundamentalste und unveränderlichste** Größe des Universums."

Ohne den genauen Zahlenwert würde die gerade im Entstehen begriffene moderne Physik auf Sand gebaut werden, meinte Millikan, denn die Elementarladung tauchte in vielen ihrer Formeln auf.

Zwar gab es erste Messungen der kleinsten Ladungsmenge, die aber äußerst ungenau waren: Gerade in dieser groben Ungenauigkeit lag ein weiterer Anreiz für Millikan: Er hoffte, es mit einer Präzisionsmessung seinem Vorbild Michelson gleichzutun.

Doch was machte Millikan bei der Messung der Elementarladung besser als seine Vorgänger?

Anders als sie versuchte der Physiker einzelne Elektronen dazu zu bringen, sich in der makroskopischen Welt bemerkbar zu machen. So wollte er den Einfluss einer einzigen Elementarladung verstärken und messen. Seine Kollegen führten die Messungen hingegen an einem Kollektiv aus vielen Elektronen durch und versuchten, die Elementarladung aus den Eigenschaften solcher Ensembles zu berechnen. Sie maßen beispielsweise die Gesamtladung eines Nebels aus geladenen Wassertröpfchen und teilten sie durch die Anzahl der Wassertröpfchen

Die entscheidende Idee Millikans bestand darin, einzelne **Wassertröpfchen** des Nebels mit einem Fernrohr zu beobachten.

Er brachte elektrisch geladene Tröpfchen zwischen zwei Kondensatorplatten, an die er eine Hochspannung anlegte. Die starke Spannung von **10 000 Volt** war Millikans Verstärker, der die Elementarladung gewissermaßen sichtbar machen sollte. Denn sie zog so stark an den Elektronen, dass einige der **Tröpfchen** die Schwerkraft überwandern und zwischen den Kondensatorplatten **schwebten**. Die Tröpfchen wurden, wie sich später zeigte, von ein paar Elektronen, teilweise nur von einem einzigen, in der **Schwebe gehalten**. Es waren gerade jene Wasserkügelchen, deren Gewicht genau der elektrostatischen Kraft entsprach, die auf die Elektronen an ihrer Oberfläche wirkte.

Millikan musste also nur noch das **Gewicht** der Tröpfchen bestimmen, um diese **Kraft** zu berechnen. Das machte er, indem er die **Spannung ausschaltete** und die **Fallgeschwindigkeit** der Kügelchen maß - diese hängt

schließlich von deren **Masse** ab. Mit solchen Zutaten in der Hand war es ein Leichtes für ihn, die jeweilige **Ladung** auf den Wasserkügelchen zu ermitteln. Es stellte sich heraus, dass sie **stets ein ganzzahliges Vielfaches des kleinsten Messwertes** betrug. Dieser minimale Wert war die gesuchte Elementarladung. Millikan bestimmte sie im **Frühjahr 1909** auf weniger als ein Prozent genau - und hatte damit die erste brauchbare Messung der fundamentalen Konstante geliefert.

Millikan war aber immer noch unzufrieden, weil die **Wassertröpfchen binnen weniger als einer Minute verdunsteten** - eine weitere Fehlerquelle, denn die **Tropfen änderten** während des Versuches ihr **Gewicht**. Er hoffte, mit langlebigeren Tröpfchen die Präzision weiter zu steigern. Eine Lösung bot **Maschinenöl**, das sich nicht so leicht verflüchtigt. Millikan blies es mit einem Parfümzerstäuber in die Versuchsanordnung. Dabei entstanden winzige **Öltröpfchen**, die durch die Reibung beim Zerstäuben elektrisch geladen waren.

Millikan verbrachte **weitere Jahre** damit, die **Präzision** der Messung zu steigern. Er tauchte die Versuchsanordnung beispielsweise in ein Bad, das die **Temperatur zwischen den Kondensatorplatten konstant** hielt. Auf diese Weise **unterband** er **Luftströmungen**, die sich auf das Schwebeverhalten der Öltröpfchen auswirkten. Schließlich, im Jahr **1913**, konnte er die **Elementarladung** auf **weniger als ein Promille genau bestimmen**. Er hatte es seinem Vorbild Michelson in Sachen Präzision gleichgetan.

Messungen mit neuen, genaueren Verfahren zeigten dann, dass Millikans Elementarladung um etwa drei Prozent zu niedrig lag: Er hatte einen **falschen Wert für die Zähigkeit der Luft** angenommen, die das Absinken der Öltröpfchen beeinflusst.



Animation

<https://www.schoett-web.de/physik/elektromagnetismus/2/index.html>

Fragen:

1. Welche Antworten hoffte man mit dem Millikan-Experiment zu erhalten?
2. Wie kann aus der angelegten Spannung U , dem Plattenabstand d und der Masse meines Probekörpers seine Ladung im Kondensatorfeld bestimmt werden?

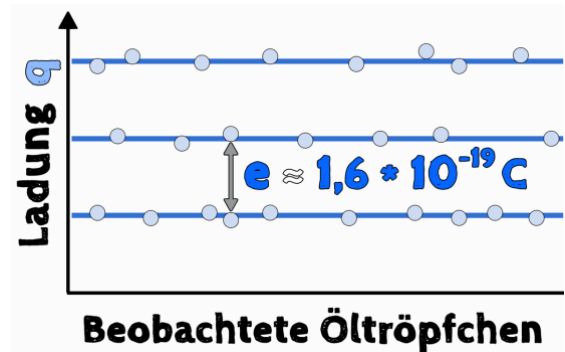
3. Wie kann aus dem Durchmesser eines Öltröpfchens und der Öldichte seine Masse bestimmt werden?
4. Wie ändert sich dadurch die Beziehung der physikalischen Größen zur Bestimmung der Tröpfchenladung? Welche Größen müssen demnach zur Durchführung des Versuchs bestimmt werden? Woher nimmt man Körper, die so kleine Ladungsmengen (Elementarladung!) tragen?
5. Wie bestimmt man die für die Ladungsberechnung notwendige Masse, dieser voraussichtlich sehr kleinen Körper?
6. Welche Probleme ergeben sich bei der praktischen Durchführung des Versuchs?
7. Welche Größen müssen also bei der Durchführung des Versuchs gemessen werden?
8. Mit welchen Größen sind die größten Messfehler verbunden?

Welche Antworten hoffte man mit dem Millikan-Experiment zu erhalten?

Das Millikan Experiment sollte beantworten, ob es **eine kleinste elektrische Ladung, eine sog. Elementarladung, gibt.**

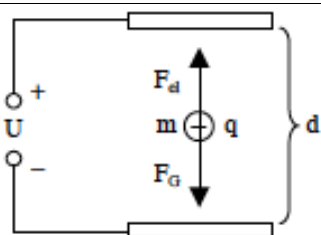
Falls vorhanden, sollte diese bestimmt werden. Damit verbunden sollte untersucht werden, ob **Ladungen in beliebigen Mengen (kontinuierlich) in der Natur vorkommen** oder nur in Portionen (quantisiert), d.h. als ganzzahlige Vielfache der Elementarladung.

- sollte beantworten, ob es eine kleinste elektrische Ladung, eine sog. Elementarladung, gibt.
- Falls vorhanden, sollte diese bestimmt werden.
- sollte untersucht werden, ob Ladungen in beliebigen Mengen (kontinuierlich) in der Natur vorkommen oder nur in Portionen (quantisiert), d.h. als ganzzahlige Vielfache der Elementarladung.



Wie kann aus der angelegten Spannung U , dem Plattenabstand d und der Masse meines Probekörpers seine Ladung im Kondensatorfeld bestimmt werden?

Welche Größen müssen also bei der Durchführung des Versuchs gemessen werden?



$$F_d = F_G \Rightarrow qE = mg \Rightarrow q = \frac{mg}{E} = \frac{mg}{\frac{U}{d}} = \frac{mgd}{U}$$

Gemessen wird U (Kondensator), Masse des Öltröpfchens m , Plattenabstand d

Woher nimmt man Körper, die so kleine Ladungsmengen (Elementarladung!) tragen?

Wie bestimmt man die für die Ladungsberechnung notwendige Masse, dieser voraussichtlich sehr kleinen Körper?

R. Millikan hat sich von 1910 an dieser Herausforderung gestellt und mit der Zeit einen entsprechenden Versuchsaufbau ersonnen. Die besten Erfolge erzielte er mit der Verwendung geladener Öltröpfchen als Probekörper. Die Öltröpfchen werden mit einem Zerstäuber erzeugt. Sie werden dadurch so heftig auseinander gerissen, dass zahlreiche positive und negativ geladene Tröpfchen entstehen. Da die Tropfenform sehr gut einer Kugel entspricht, konnte er die Masse eines Tropfens sehr einfach aus seinem Durchmesser und der bekannten Dichte des verwendeten Öls bestimmen.

Wie kann aus dem Durchmesser eines Öltröpfchens und der Öldichte seine Masse bestimmt werden?

Wie ändert sich dadurch die oben aufgestellte Beziehung zur Bestimmung der Tröpfchenladung?

Welche Größen müssen demnach für zur Durchführung des Versuchs bestimmt werden? Woher nimmt man Körper, die so kleine Ladungsmengen (Elementarladung!) tragen?

Wie bestimmt man die für die Ladungsberechnung notwendige Masse, dieser voraussichtlich sehr kleinen Körper?

Dichte-> Masse des Tröpfchens	$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V$
Durchmesser-> Radius-> Volumen	$V = \frac{4}{3} r^3 \pi$
zusammenfassen	$m = \rho \cdot \frac{4}{3} r^3 \pi \Rightarrow q = \frac{\rho \cdot \frac{4}{3} r^3 \pi \cdot g \cdot d}{U}$
messen	d; U; r

Welche Probleme ergeben sich bei der praktischen Durchführung des Versuchs?

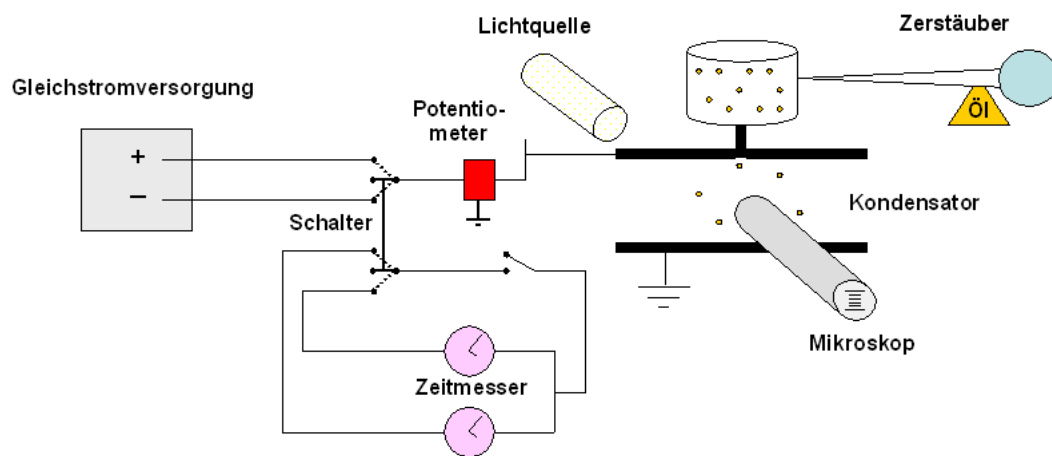
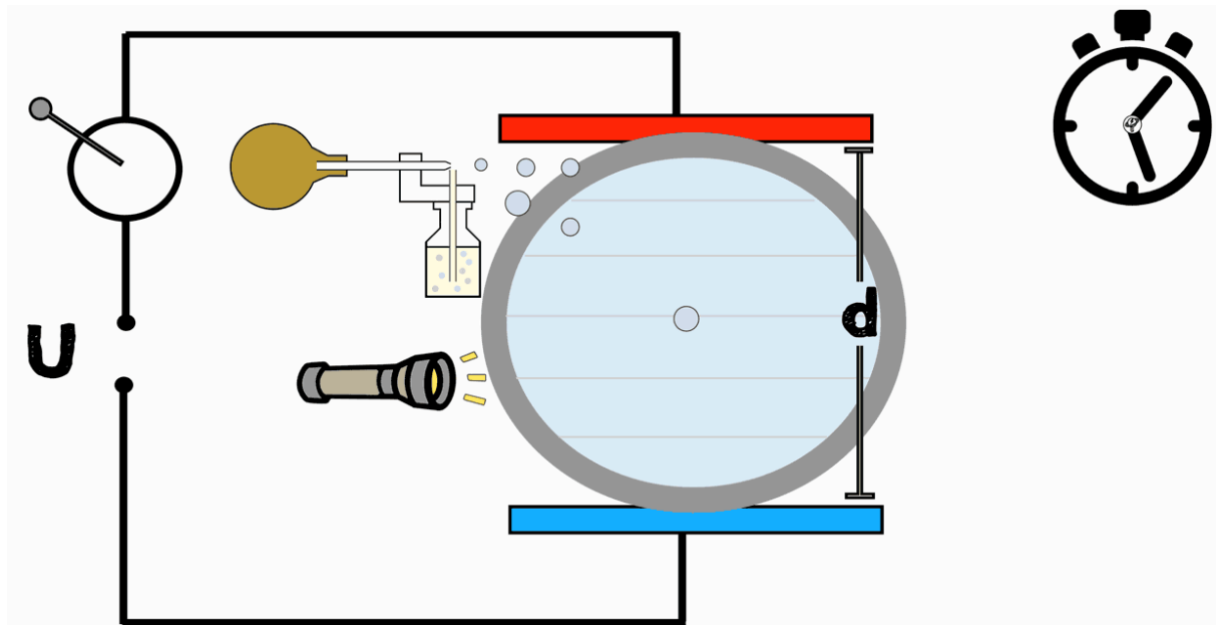
Millikan war sich der Schwierigkeiten durchaus bewusst. Er hat daraufhin mit den Jahren seine Verfahren immer weiter verbessert. So hat er z. B. die Masse der Tröpfchen später nicht mehr aus der fehleranfälligen Durchmesserbestimmung ermittelt, sondern aus der Zeit, welche die Tröpfchen zum Durchqueren des Kondensators im freien Fall, d. h. ohne eine angelegte Spannung benötigen.

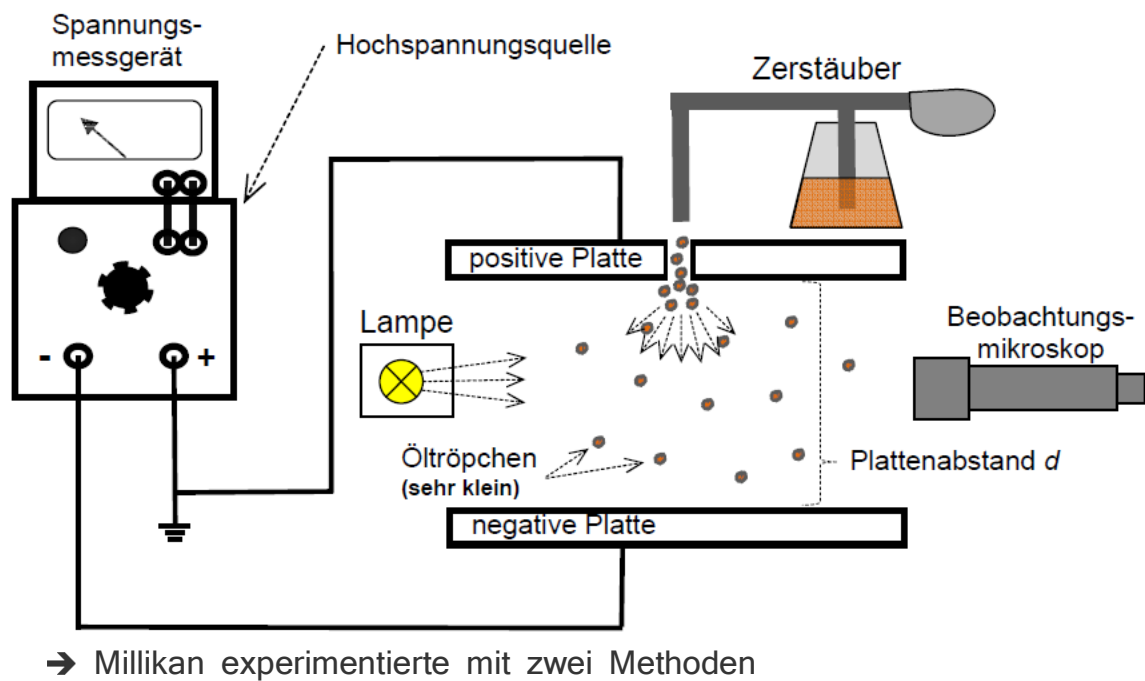
⇒ **Masse** des Tröpfchens aus der **Zeit** bestimmt, die es zum Durchqueren des Kondensators braucht (ohne U)

Mit welchen Größen sind die größten Messfehler verbunden?

1. Radius geht mit der dritten Potenz in die Rechnung ein. -> **r³**
(Fehler bei seiner Bestimmung haben großen Einfluss auf das experimentelle Ergebnis.)

Versuchsaufbau



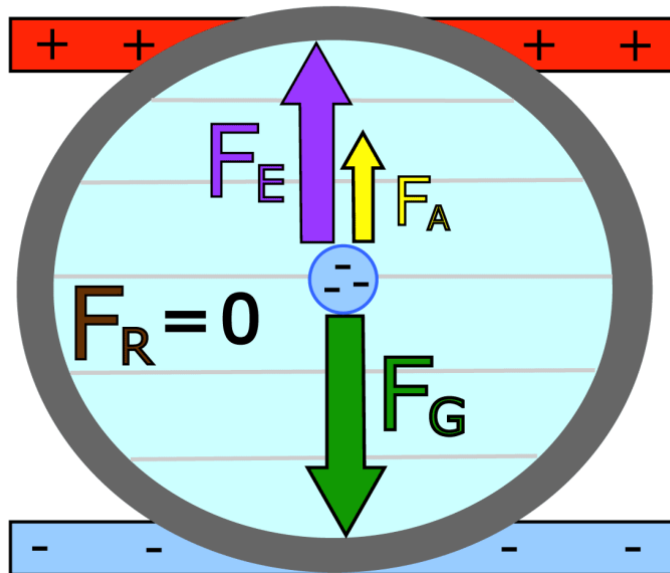


SCHWEBEMETHODE *oder* GLEICHFELDMETHODE

SCHWEBEMETHODE

Tröpfchen sind sehr klein, müssen durch ein Mikroskop betrachtet werden. Das ist auch deshalb nötig, um den für die Bestimmung der Tröpfchenmasse zu ermittelnden Radius auszumessen. Damit Tröpfchen im Mikroskop überhaupt zu beobachten sind, müssen sie im Kondensatorzwischenraum seitlich beleuchtet werden. Für den Kondensator ist ein Plattenabstand von nur wenigen Millimetern ist zur Beobachtung der Tröpfchen völlig ausreichend.

SCHWEBEN DES ÖLTRÖPFCHENS

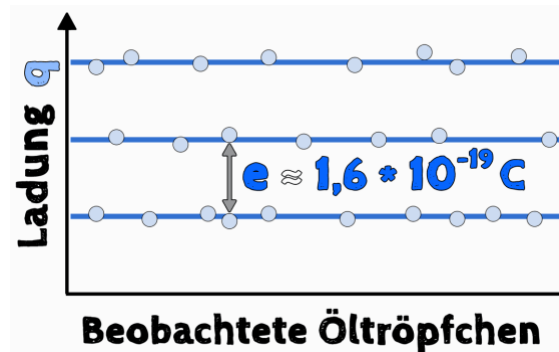


Schweben	Sinken
<p>→ Auftriebskraft wird vernachlässigt</p> $F_G = F_{el}$ <p>Mit $F_{el} = E \cdot Q$ und $E = \frac{U}{d}$ ergibt sich für die Ladung des Öltröpfchens</p> $Q = \frac{F_G \cdot d}{U}$ <p>→ mit Auftriebskraft</p>	

- Was bedeuten diese Beobachtungen?

- Die Öltröpfchen können anscheinend nur Vielfache einer kleinstmöglichen Ladungsmenge tragen. Diese kleinste Ladungsmenge nennen die Physiker daher **Elementarladung** e .

- $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$



2. Wie kann aus der angelegten Spannung U , dem Plattenabstand d und der Masse des Probekörpers seine Ladung im Kondensatorfeld bestimmt werden?

Aufgabe

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/ladungen-elektrisches-feld/aufgabe/millikan-versuch-abitur-2005-gk-a1-1>