

Der Begriff der elektrischen Ladung geht zurück auf Benjamin Franklin (1706-1790). Er hat damit die recht umständliche Umschreibung von „Körpern, die in einen elektrischen Zustand versetzt worden sind“, ersetzt. Franklin ging dabei noch von einer einzigen Ladungsart aus, die den elektrischen Zustand eines Körpers durch einen Mangel oder Überfluss beschreibt. Während wir heute eine recht genaue Vorstellung damit verbinden, was unter Ladungen zu verstehen ist, so war 150 Jahre nach Franklins Tod noch immer nicht klar, was man sich unter Ladungen vorzustellen. Der Begriff war zwar geeignet um bestimmte Erscheinungen prägnant zu beschreiben, die Prozesse, wie bzw. wodurch sich ein Körper auflädt, blieben aber weiter im Dunkeln. Aus verschiedenen Versuchen war bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts zumindest klar geworden, dass grundsätzlich zwischen zwei Ladungsarten unterschieden werden muss, wobei eine einfach als „positiv“ und der andere als „negativ“ bezeichnet wurde. Weiter galt als gesichert, dass Atome irgendwie aus positiven und negativen Konstituenten aufgebaut sind und diese Bestandteile wohl auch sonst verantwortlich für die Ladung z. B. einer Kugel sind. Die Frage allerdings, wie diese einzelnen Teile im Atom zusammengehalten werden, blieb aber weiter offen.

Aus der Beschäftigung mit Kathodenstrahlen (die wir heute als die in einem Strahl gebündelten, aus einer geheizten Elektrode austretende Elektronen verstehen) folgerte J. J. Townsend, dass negativ geladene Teilchen, die Elektronen, im Aufbau von Atomen eine wesentliche Rolle spielen. Nach dem auf diesen Versuchen begründeten Atommodell von Thomson sollten die Elektronen dabei in einer Art positiver Flüssigkeit schwimmen, ähnlich den Rosinen in einem Kuchenteig. Unklar blieb, wie viele Elektronen denn nun so ein Atom enthält oder ob etwa Atome eines Elements immer die gleiche Anzahl an Elektronen müssen. Diese Fragen berühren direkt das Verständnis nach dem Aufbau des Periodensystems, sowie Erklärungsversuche zur Natur der radioaktiven Strahlung, also Betrachtungen zu Aufbau und Stabilität der Materie überhaupt. Vordergründig war dabei zu klären, ob ein Elektron beliebige negative Ladungsmengen tragen oder nur bestimmte diskrete Werte annehmen kann. Demnach wäre es ebenfalls durchaus denkbar, dass Elektronen noch nicht einmal alle die gleiche Ladung tragen müssen.

In der Zeit um 1900 war damit die Suche nach der Ladung des Elektrons eines der vordringlichsten Probleme der Physik. Neben anderen Forschern hat sich Robert Millikan (1868-1953) eingehend mit der Problematik befasst und für seine Erfolge schließlich 1923

O. Lodge stellte 1906 die in seiner Zeit diskutierten Atomvorstellungen einander gegenüber:

1. Das Atom kann zum Großteil aus gewöhnlicher Materie bestehen (was sich auch immer hinter diesem gewohnten Ausdruck verbirgt), mit welcher positive Elektrizität (was auch immer diese Elektrizität darstellt) in entsprechender Menge gekoppelt ist, um die Ladung des Elektrons oder der Elektronen zu neutralisieren, die zweifellos in Verbindung mit jedem einzelnen Atom existieren.

2. Oder es besteht das Atom zum Großteil aus einer Vielzahl von positiven und negativen Elektronen, die irgendwie miteinander verflochten und durch gegenseitige Anziehung in einer Gruppe zusammengehalten werden, sei es im Zustand einer komplizierten Bahnbewegung, sei es in irgendeiner statischen geometrischen Konfiguration, durch entsprechende Bindungen in permanenter Lage gehalten.

3. Oder das Atom besteht zum Großteil aus einer unteilbaren Einheit positiver Elektrizität, die eine Masse oder ein solzartiges Gebilde von Kugelform - wie angenommen werden kann - bildet, und in die eine elektrisch äquivalente Anzahl von Elektronen sozusagen eingebettet ist.

4. Es kann aber auch (das Atom) aus einer festen Mischung aneinander gebundener positiver und negativer Elektrizität bestehen, die unteilbar, in kleinere Einheiten nicht mehr auflösbar ist und die durch äußere Kräfteinwirkungen nicht merklich verformt werden kann, sondern uns als kontinuierliche Masse erscheint. Von diesen Ladungen besitzen jedoch ein oder mehrere isolierte und individualisierte Elektronen Bewegungsfreiheit, und es sind ihnen alle jene äußeren Aktivitäten zuzuschreiben, die dem Atom die an ihm beobachteten Eigenschaften verleihen.

5. Nach der fünften Auffassung ist das Atom als Sonnensystem anzusehen: im Mittelpunkt eine "Sonne" -eine außerordentlich konzentrierte positive Elektrizität -umgeben von einer Vielzahl von Elektronen, die auf astronomischen Bahnen umlaufen, wie Planeten im Wirkungsbereich ihrer Anziehung. Diese Anziehungskraft würde für sie jedoch eine umgekehrt quadratische Abhängigkeit haben und folglich auch Umlaufzeiten bedingen, die von der Entfernung abhängen, was aber keiner bisher auf befriedigende Weise beobachteten Tatsache entspricht.

O. LODGE: *Electrons*. 1906.

den Nobelpreis erhalten. Insbesondere haben seine Ergebnisse wesentlich zur Weiterentwicklung damals diskutierter Atommodelle oder auch ihrem Sturz beigetragen.

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

Das Millikan-Experiment wurde immer wieder weiter verbessert und wiederholt. Erst im Jahre 2000 endete eine Versuchsreihe am Stanford Linear Accelerator, um die Elementarladung mit noch größerer Genauigkeit zu bestimmen. Auch heute noch ist der genaue Wert der Elementarladung ein wichtiger Test für viele physikalische Theorien der Teilchenphysik.

Die Bedeutung des Millikan-Experiments

Station 1

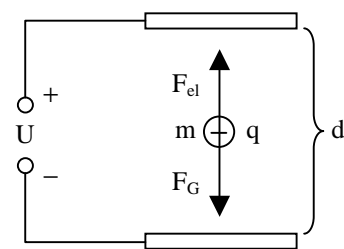
Welche Antworten hoffte man mit dem Millikan-Experiment zu erhalten?

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.

Auf der Suche nach der Ladung des Elektrons gelang Thomson ein Etappenerfolg. Er konnte aus Versuchen mit Elektronenstrahlen zumindest das Verhältnis von Elektronenladung zu Elektronenmasse bestimmen. Die Frage, ob das Elektron aber tatsächlich Träger einer kleinst möglichen Ladung, einer Elementarladung ist, konnte er aber auch damit nicht eindeutig klären.

Im Grunde besteht das experimentelle Hauptproblem darin, dass sehr kleine Ladungen nicht direkt bestimmt werden können. Der Physiker Ehrenhaft hatte nun die Idee das Kräftegleichgewicht zwischen der Gewichtskraft und der elektrischen Kraft auf einen geladenen Probekörper im homogenen Feld eines Plattenkondensators auszunutzen, um so die Probeladung zu ermitteln.

Fragen: Wie kann aus der angelegten Spannung U , dem Plattenabstand d und der Masse m eines Probekörpers seine Ladung im Kondensatorfeld bestimmt werden? Welche Größen müssen also bei der Durchführung des Versuchs gemessen werden?



Die Verwirklichung der an sich einfachen Idee Ehrenhafts stellte die Experimentatoren aber vor weitere Probleme:

1. Woher nimmt man Körper, die so kleine Ladungsmengen (Elementarladung!) tragen?
2. 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.



Fragen: 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?

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

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

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

Gemessen werden müssen die am Kondensator anliegende Spannung U , die Masse des beobachteten Tropfens und der Plattenabstand d .

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?

Aus der Dichte lässt sich bei bekannten Volumen die Masse bestimmen: $\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V$

Aus dem Durchmesser lässt sich der Radius r eines kugelförmigen Tropfens bestimmen und daraus sein Volumen: $V = \frac{4}{3}r^3\pi$

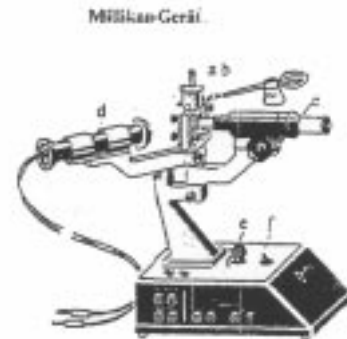
$$\text{Damit gilt: } m = \rho \cdot \frac{4}{3}r^3\pi \quad \Rightarrow \quad q = \frac{\rho \cdot \frac{4}{3}r^3\pi \cdot g \cdot d}{U}$$

Gemessen werden müssen folglich neben dem Plattenabstand d und der angelegten Spannung der Durchmesser bzw. der Radius des beobachteten Tropfens.

Für ein geladenes Öltröpfchen im homogenen Feld eines Plattenkondensators kann die Tröpfchenladung aus der Spannung bestimmt werden, die angelegt werden muss, um das Tröpfchen in der Schwebe zu halten.

Da die Tröpfchen sehr klein sind, müssen sie durch ein Mikroskop betrachtet werden. Das ist auch deshalb nötig, um den für die Bestimmung der Tröpfchenmasse zu ermittelnden Radius auszumessen. Damit die Tröpfchen im Mikroskop überhaupt zu beobachten sind, müssen sie im Kondensatorzwischenraum seitlich beleuchtet werden. Die Tröpfchen heben sich dadurch als helle „Scheibchen“ gut vom dunkleren Hintergrund ab. Für den Kondensator ist ein Plattenabstand von nur wenigen Millimetern ist zur Beobachtung der Tröpfchen völlig ausreichend.

Hinweise zum Versuchsaufbau:
Die bei (a) eingespritzten Öltröpfchen gelangen durch eine feine Bohrung in den durch Glasplatten abgeschlossenen Kondensator (b) mit dem Plattenabstand $d = 2,5 \text{ mm}$. Mit einem Mikroskop (c) kann der Raum zwischen den Kondensatorplatten sorgfältig beobachtet werden. Mit der Lampe (d) bestrahlt man diesen Raum so, daß kein direktes Licht, sondern nur das von den Teilchen gestreute Licht in das Mikroskop tritt. Die Tröpfchen erscheinen als helle Punkte vor dunklem Hintergrund (Dunkelfeldbeleuchtung). Mit dem Potentiometer (e) kann die Kondensatorspannung und damit die Stärke des elektrischen Feldes eingestellt werden. Durch Umpolen mit dem Schalter (f) kann die Feldrichtung umgekehrt werden.



Bei der Durchführung wählt man nun ein bestimmtes Tröpfchen für die Messung aus. Kleine Tröpfchen sind zu bevorzugen, da diese vermutlich auch die kleinsten Ladungen tragen. Für dieses Tröpfchen wird nun die an den Kondensatorplatten anliegende Spannung so lange hochgeregelt, bis das Tröpfchen sich nicht mehr bewegt. Je nach dem ob das Tröpfchen positiv oder negativ geladen ist, ist es möglicherweise notwendig die Spannung an den Kondensatorplatten umzupolen. Mit Hilfe im Okular angebrachten Skala kann dann noch der Durchmesser des Tröpfchens bestimmt werden. Aus dem Wert der eingestellten Spannung und dem abgelesenen Durchmesser kann schließlich die Ladung des Tröpfchens bestimmt werden.

Fragen: Welche Probleme ergeben sich bei der praktischen Durchführung des Versuchs?
(Vergleichen sie auch im Buch S. 32)

Mit welchen Größen sind die größten Messfehler verbunden?

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.

Welche Probleme ergeben sich bei der praktischen Durchführung des Versuchs?

- Der Schwebefall ist aufgrund der Brownschen Molekularbewegung nur schwer einzustellen.
- Wegen Beugungserscheinungen erscheint das Tröpfchen tatsächlich größer, als es ist. Der Durchmesser ist daher nicht genau festzulegen.

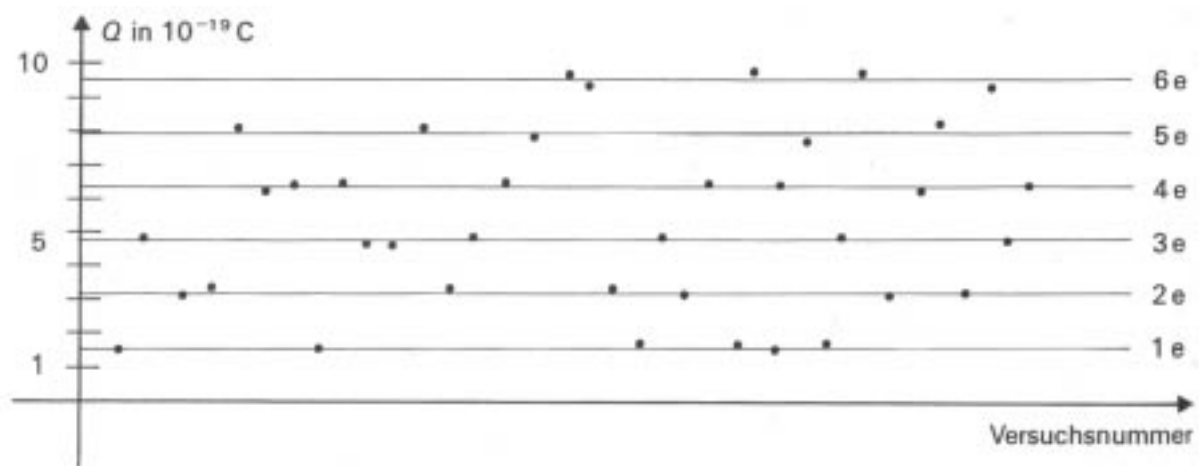
Mit welchen Größen sind die größten Messfehler verbunden?

Der Radius geht mit der dritten Potenz in die Rechnung ein (vgl. Station 2). Fehler bei seiner Bestimmung haben großen Einfluss auf das experimentelle Ergebnis.

R. Millikan hat mit seinen zwischen 1910 bis 1916 durchgeführten Experimenten die Elementarladung e bestimmt. Die in den verschiedenen Versuchen ermittelten Resultate lassen sich grafisch wie folgt auftragen. Die Elementarladung e kann demnach auf $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ bestimmt werden.

Fragen: Wie ergibt sich der Wert für e aus der Grafik?

Welche weiteren Ergebnisse lassen sich noch aus der Versuchsreihe ablesen?



Der Physiker Ehrenhaft zweifelte Millikans Interpretation der Messergebnisse wiederholt an und wollte nicht ausschließen, dass Elektronen durchaus beliebige Ladungen tragen könnten. Er war u. a. der Meinung, dass die Ladungsmessung in Millikans Experiment mit so großen Fehlern behaftet ist, dass die Ergebnisse keine Aussagekraft mehr hätten.

- Bestimmen sie unter der Annahme, dass die Toleranz in der Ladungsmessung etwa 10% beträgt, innerhalb welcher Grenzen für die Ladungen $Q = e, 2e, \dots$ die tatsächlichen Messergebnisse liegen könnten.
- Wie hoch (in Prozent) darf der Messfehler höchstens sein, wenn auch noch Messungen für $Q = 10e$ berücksichtigt werden sollen?

Wie ergibt sich der Wert für e aus der Grafik?

Welche weiteren Ergebnisse lassen sich noch aus der Versuchsreihe ablesen?

- Es ist niemals eine kleinere Ladungsmenge als $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ beobachtet worden.
- Jede beobachtete Ladungsmenge ist ganzzahliges Vielfaches dieser Elementarladung.