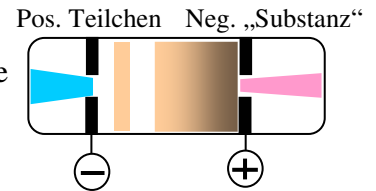


6) Das Elektron, der Millikan Versuch

- a) Historischer Vorlauf: Zu Beginn des 19. Jahrhundert wurde insbesondere durch das Gesetz der konstanten Proportionen der Chemie klar, dass die Materie aus Atomen bestehen muss. Auch das Verhalten der Gase bei Temperatur-, Druck- und Volumenänderung wurde nur mittels der Atomvorstellung verständlich. Aber woraus bestehen die Atome ihrerseits?

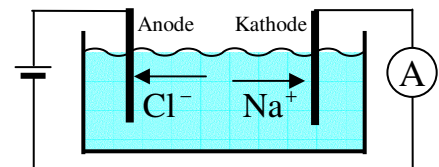
Im Jahre 1886 leitete Eugen Goldstein stark verdünntes Natriumgas in einen Glaszylinder mit zwei aufgebohrten Elektroden. Bei angelegter Hochspannung traten hinter den Elektroden leuchtende Teilchenstrahlen aus. Der Versuch zeigte, dass sich Atome in etwas *Positives* und etwas *Negatives* aufspalten lassen. Weitere Versuche ergaben, dass der positive Anteil aus Natriumionen bestand. Für das Atom existierten zur damaligen Zeit verschiedene Modelle. Deshalb war nicht klar, dass der negative Strahl aus einzelnen Teilchen, den Elektronen, besteht.



Es hätte auch eine, den Raum gleichmäßig erfüllende, „negative Substanz“ sein können.

- b) Faradayexperiment: Elektrochemische Bestimmung der Ionen-Ladung per Elektrolyse.

Bei der Elektrolyse scheiden sich an Anode und Kathode Ionen ab. Deren Anzahl ist proportional zur durchgeflossenen Ladung $Q = I \cdot t$. Aus den Messdaten lässt sich dann die Ionenladung ermitteln.



Beispiel: Während der Dauer $\Delta t = 2\text{ h}$ fließt ein konstanter Strom der Stärke $I = 30\text{ A}$.

Dann ist die Ladung $Q = I \cdot \Delta t = 30\text{ A} \cdot 2 \cdot 3600\text{ s} = 216\,000\text{ C}$ geflossen. Dabei wird $M = 51,5\text{ g}$ Natrium abgeschieden. Ein Natriumatom hat die Masse

$m = 23u$ mit der atomaren Masseneinheit $u = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$. Die abgeschiedene Natriummasse besteht daher aus $n = M / m = 0,0515\text{ kg} / (23 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}\text{ kg}) = 1,35 \cdot 10^{24}$ Teilchen.

Somit trägt ein Natriumion die Ladung $q = 216\,000\text{ C} / 1,35 \cdot 10^{24} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$. Demnach sollte die pro Ion abgetrennte Ladung bei Goldstein entsprechend $q = -1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ betragen.

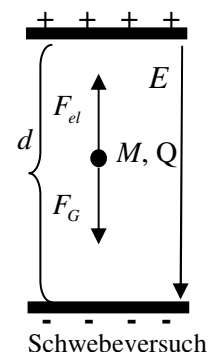
Es war aber *unklar*, ob dies nur ein *Mittelwert* ist oder ob der Wert für jedes Atom *einzel*n gilt.

- c) Der Millikan Versuch zum Nachweis einzelner Elektronen.

(1) Konzept: Um Elektronen zu handhaben, müssen diese an ein „Vehikel“ geheftet werden, denn einzelne Elektronen lassen sich nicht „managen“. Millikan verwendete zum „Anheften“ *kleinste* Tröpfchen aus schwerflüchtigem Öl. Wassertröpfchen verdunsten zu schnell. Bei der Tröpfchenherstellung im Zerstäuber laden sich diese durch Abrieb an der Düse *minimal* auf. Nur so lässt sich nachweisen, dass die Tröpfchenladung Q ein *ganzzahliges* Vielfaches von $e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ ist, dass also z.B. $Q = 1 \cdot e$; $2 \cdot e$; .. gilt und nicht etwa $Q = 2,5 \cdot e$.

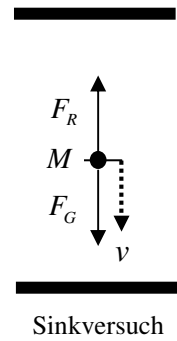
(2) Der Schweben-Versuch In einem *ersten* Versuch werden die Tröpfchen zwischen die Platten eines Kondensators mit Plattenabstand d geblasen. Ohne angelegte Spannung U sinken die Tröpfchen. Nun wird U so einreguliert, dass ein beobachtetes Tröpfchen *schwebt*. Dazu muss die elektrische Kraft $F_{el} = Q \cdot E = Q \cdot U / d$ die Schwerkraft $F_G = M \cdot g$ kompensieren. Die *Schwebenbedingung* liefert eine Bestimmungsgleichung für die gesuchte Tröpfchenladung

$$Q = \frac{M \cdot g \cdot d}{U}$$



(3) Der Sink-Versuch. In der Formel für die Tröpfchenladung Q steht die Tröpfchenmasse M . Es wurden extra Q und M für die Tröpfchenladung und Tröpfchenmasse verwendet, um eine Verwechslung mit der Elektronenladung e und der Elektronenmasse m_e auszuschließen. Da der Tröpfchendurchmesser in der Größenordnung der Wellenlänge $\lambda \approx 400\text{ nm} = 4 \cdot 10^{-7}\text{ m}$ des

sichtbaren Lichtes ist, lässt sich nur die *Position*, nicht aber ihre *Größe* der Tröpfchen optisch ermitteln. Die Bestimmung dieser Daten erfolgt deshalb mit Hilfe eines *Sinkversuches*. Nach einer kurzen Anfangsbeschleunigung sinkt das Tröpfchen *gleichförmig* mit *konstanter* Geschwindigkeit. Nur bei Kräftefreiheit bewegt sich ein Körper gleichförmig gradlinig. Beim gleichförmigen Sinken heben sich also die Schwerkraft $F_G = M \cdot g$ und die Reibungskraft F_R auf. Wird eine Kugel mit dem Radius r von einer Flüssigkeit oder einem Gas mit der Zähigkeit η laminar = wirbelfrei umströmt, so gilt für die Reibungskraft das *Stokesche Gesetz* $F_R = 6\pi\eta r v$. Dabei ist v die Umströmungs- bzw. die *Sinkgeschwindigkeit*. Gleichsetzen ergibt $M \cdot g = 6\pi\eta r v$.



Mit der Öldichte ρ folgt $\frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g = 6\pi\eta r v$. $\frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g = 6\pi\eta r v \quad \left| \cdot \frac{3}{4\rho \cdot g} \right.$

ergibt $r^2 = \frac{3 \cdot 6\eta v}{4\rho \cdot g}$ bzw. $r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}}$. Mit $M = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho$ folgt dann die Masse.

(4) Versuchsergebnisse

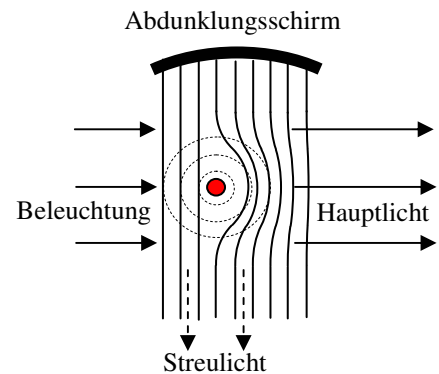
Daten: $d = 5\text{mm}$; $\rho = 971,7 \text{ kg/m}^3$; $\eta = 1,83 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

	Schweben	Sinken	Auswerten			
	U in V	Geschw. v in m/s	Radius in m	Masse in kg	Ldg Q in C	Q/e
(1)	475	$0,6 \cdot 10^{-4}$	$7,20 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-15}$	$1,57 \cdot 10^{-19}$	0,98
(2)	562	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,75 \cdot 10^{-7}$	$3,77 \cdot 10^{-15}$	$3,29 \cdot 10^{-19}$	2,06
(3)	405	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$7,89 \cdot 10^{-15}$	$9,56 \cdot 10^{-19}$	5,97

(5) Beobachtungsproblematik

Messung der Tröpfchenposition: Die Ladung geeigneter Tröpfchen darf nur aus *wenigen* Elektronen bestehen. Dafür muss der Tröpfchendurchmesser i.A. kleiner als die Wellenlänge λ des sichtbaren Lichtes sein. Dann ist eine *Abbildung* per Lichtmikroskop aber nicht mehr möglich. Verwendung von kürzerwelligem Licht führt zu Ionisation und fällt daher aus. Da aber Masse und Durchmesser in obiger Rechnung eliminiert werden, braucht man die Tröpfchen gar nicht abzubilden. Es reicht, die *Position* der Tröpfchen durch seitliches Streulicht zu ermitteln.

Mittels dieser sog. *Dunkelfeldmethode* lässt sich die Position auch dann ermitteln, wenn $2r$ kleiner als λ ist.



In der Dunkelfeldmethode wird nur das seitliche Streulicht beobachtet.

(6) Versuchsdurchführung (1) Licht einschalten, Mikroskop justieren. (2) Tröpfchen einblenden. (3) Ein beobachtetes Tröpfchen auswählen und dieses durch geeignete Wahl der Kondensatorspannung zum Schweben (zum Stillstand) bringen. Spannungswert notieren. (4) Spannung abschalten und Sinkgeschwindigkeit des ausgewählten Tröpfchens bestimmen.

(7) Schlussfolgerung.

Die elektrische Ladung ist *portioniert* bzw. *quantisiert*.

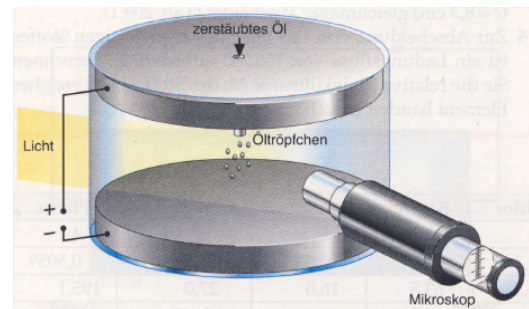
Die *Elementarladung* $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ist die kleinstmöglich existierende Ladung. Alle übrigen Ladungen sind *ganzzahlige Vielfache* der Elementarladung.

So besteht z.B. $Q = 1 \text{ Coulomb}$ aus $6\,241\,509\,074\,460\,763\,000$ Elementarladungen.

Ja, seit dem Jahre 2019 ist das Coulomb nicht mehr klassisch, sondern über die sehr präzise gemessene Elementarladung e definiert.

Aufgaben

- 1) Dass die Materie eine „körnige“ Struktur hat und aus Atomen besteht, wurde deshalb lange angezweifelt, weil damals keine Antwort auf die „leeren Zwischenräume“ gegeben werden konnte und ein „Nichts“ nicht vorstellbar war (und es bis heute nicht ist). Benenne, welche physikalisch-chemischen Erfahrungen dennoch für die Atomvorstellung sprachen.
- 2) Eugen Goldstein stellte in einem historischen Experiment fest, dass Atome aus eine elektrisch negative und elektr. positive „Substanz“ enthalten. Schildere den Versuch und sein Ergebnis.
- 3) Bei einem Elektrolyseversuch wird KCl zersetzt. Während der Dauer $\Delta t = 2,6 h$ fließt ein konstanter Strom der Stärke $I = 16 A$. Währenddessen werden $M = 60 g$ Kalium abgeschieden. Ein Kaliumatom hat die Masse $m = 39 u$ mit der atomaren Masseneinheit $u = 1,66 \cdot 10^{-27} kg$. Bestimme aus diesen Daten die Elementarladung e . Begründe, dass der Faraday-Versuch nur einen *Mittelwert* für e liefert.
- 4) Der Faraday-Versuch liefert bereits den Wert der Elementarladung e . Wieso wurde der Millikan-Versuch so wichtig genommen und sogar mit einem Nobelpreis geehrt?
- 5) Erläutere die Zielstellung des Millikanversuches.
- 6) Erläutere die Notwendigkeit der Verwendung von Öl- anstatt Wassertröpfchen.
- 7) Benenne die Beobachtungsschwierigkeiten und die Abhilfe.
- 8) Beschreibe den Versuchsaufbau des Millikanexperimentes anhand der nebenstehenden Abbildung.
- 9) Benenne das *Kräftegleichgewicht* für das Schweben des Tröpfchens und leite die Schwebebedingung her.
- 10) Benenne das *Kräftegleichgewicht*, welches beim gleichförmigen Sinken gilt.
- 11) Leite aus dem Kräftegleichgewicht für gleichförmiges Sinken die Gleichung für den Tröpfchenradius $r = \sqrt{9\eta v / 2\rho g}$ her. Benenne die Bedeutung der auftretenden Größen.
- 12) Bestimme die Tröpfchenladung Q für die angegebenen Messdaten:



Neue Daten: $d = 6 mm$; $\rho = 923 kg / m^3$; $\eta = 1,83 \cdot 10^{-5} kg / m \cdot s$; $g = 9,81 m / s^2$

	Schweben	Sinken	Auswerten			
	U in V	Geschw. v in m/s	Radius in m	Masse in kg	Ldg Q in C	Q/e
(1)	425	$0,5 \cdot 10^{-4}$				
(2)	262	$0,9 \cdot 10^{-4}$				
(3)	325	$1,2 \cdot 10^{-4}$				

Lösung

1) Chemischen Erfahrungen: Gesetz der konstanten Proportionen: In einer chemischen Verbindung stehen die darin enthaltenen Elemente in einem festen Masseverhältnis. Will ich doppelt so viel von der Verbindung haben, so brauche ich von allen Bestandteilen auch doppelt so viel. Z.B. braucht man für das Kochsalz Natriumchlorid NaCl stets 39% Natrium und 61% Chlor. Bei falschem Verhältnis bleibt etwas vom Natrium bzw. etwas vom Chlor übrig.

Physikalische Erfahrung: Die Atom- bzw. Teilchenvorstellung ermöglicht es, die Größen der Wärmelehre, wie die (absolute) Temperatur T , den Druck p und die Volumenänderung ΔV aus den mechanischen Größen der Teilchenbewegung herzuleiten. So ist z.B. die Temperatur die mittlere kinetische Energie pro Freiheitsgrad der sich bewegenden Teilchen. Z.B. nimmt Wasserdampf pro Grad Temperaturerhöhung viel mehr Energie auf als Heliumgas, weil die H_2O -Teilchen außer dem Geradeausflug auch den Freiheitsgrad des „Rotierens“ und des „Schwingers“ haben. Ein rotierendes He-Atom unterscheidet sich erst bei extrem hohen Temperaturen vom nicht rotierenden He, so dass der Freiheitsgrad des Rotierens beim Heliumatom „eingefroren“ ist. Zugeführte Wärme kann sich beim He nicht auf mehrere Freiheitsgrade verteilen und lässt sofort die Temperatur des Heliumgases ansteigen, obwohl kaum etwas „dahinter steckt“. Anders beim Wasserdampf: Steigt hier die Temperatur, so wurden alle Freiheitsgrade der Bewegung gleichmäßig „befüllt“. So erklärt die „kinetische Gastheorie“ ohne Mühe, dass Wasserdampf eine viel höhere Wärmekapazität hat als Heliumgas. Es wurde keine andere Theorie gefunden, welche die Tatsachen der Wärmelehre erfolgreich erklären kann. Die Erklärbarkeit der Phänomene der Wärmelehre gibt also einen extrem starken Hinweis darauf, dass die Körper aus Atomen bestehen. Das ist bedeutend, weil die Atome hier durch Denken und Erklären, nicht aber durch direktes „Sehen“ erkannt werden.

2) Recherchiere auch das Thema „Kanalstrahlen“ im Internet.

3) $Q = I \cdot \Delta t = 16A \cdot 2,6 \cdot 3600s = 149\,760\,C$. $M = 0,06\,kg$ Kalium. Kaliumatom $m = 23u$.
 $n = M / m = 0,06\,kg / (39 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}\,kg) = 9,27 \cdot 10^{23}$ Teilchen. $q = 1,62 \cdot 10^{-19}\,C$.

4) Der Faraday-Versuch liefert per Elektrolyse nur einen Mittelwert für die Elementarladung. Millikan bewies, dass es wirklich „Elektronen gibt“ und nicht nur eine „negative Substanz“.

5) Die Zielsetzung war, die Existenz des Elektrons zu beweisen.

6) Wassertröpfchen der „Millikan-Größe“ verdunsten bereits in wenigen Sekunden.

7) Die Tröpfchen sind meist kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Sie können deshalb, selbst mit einem Mikroskop ausreichender Vergrößerung, nicht als solche abgebildet werden. Den kleinstmöglichen Auflösungsabstand $d = \lambda / n \cdot \sin \alpha$ hat Ernst Abbe hergeleitet und damit den Zeiss Mikroskopen Weltgeltung verschafft. Die Dunkelfeldmethode nutzt das seitliche Streulicht. Die Tröpfchen erscheinen dann als leuchtende Punkte ohne Struktur.

8) Verkapselte Kondensatorplatten mit einer verdunkelten Seite, regelbare Spannungsquelle, Voltmeter, Lampe, Mikroskop, Stoppuhr, Zerstäuber.

9) Kräftegleichgewicht für das Schweben: $F_G = F_{el}$.

10) Kräftegleichgewicht für gleichförmiges Sinken: $F_G = F_R$.

11) Umstellen von $(4/3) \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g = 6 \pi \eta r v$ ergibt $r = \sqrt{9 \eta v / 2 \rho g}$.

12)

	Schweben	Sinken	Auswerten			
	U in V	Geschw. v in m/s	Radius in m	Masse in kg	Ldg Q in C	Q/e
(1)	425	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$6,74 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-15}$	$1,64 \cdot 10^{-19}$	1,03
(2)	262	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$9,05 \cdot 10^{-7}$	$2,86 \cdot 10^{-15}$	$6,43 \cdot 10^{-19}$	4,02
(3)	325	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$4,41 \cdot 10^{-15}$	$7,98 \cdot 10^{-19}$	4,99