

Versuch 242

Elektrische und magnetische Krafteinwirkung auf geladene Teilchen

Lernziele: Ein Magnetfeld übt auf eine bewegte Ladung eine Kraft aus, sei es ein geladenes Einzelteilchen oder eine geordnete Bewegung vieler Ladungsträger wie z.B. ein Elektronenstrahl oder ein Strom in einem Leiter. Ein elektrisches Feld übt eine Kraft auf eine Ladung aus, egal ob diese stationär ist oder sich bewegt. Die Kraft auf eine Probeladung dient zum Nachweis eines elektrischen Feldes.

Im ersten Versuchsteil wird mit einem Fadenstrahlrohr das Verhalten eines Elektronenstrahls in einem transversalen, homogenen Magnetfeld demonstriert: der Weg des Elektronenstrahles wird durch das Rekombinationsleuchten ionisierter Gasatome sichtbar. Diese Versuchsanordnung ermöglicht die Bestimmung des Wertes der spezifischen Ladung e/m für langsam bewegte Elektronen.

Im zweiten Versuchsteil wird die elektrische Kraftwirkung auf geladene Öltröpfchen nach Millikan gemessen. Damit kann die Größe e der Elementarladung bestimmt werden. Aus e/m und e folgt die Masse des Elektrons.

Kenntnisse: Elementarladung; Lorentz-Kraft; Bewegung von Elektronen in elektrischen und magnetischen Feldern; Erzeugung von Elektronenstrahlen; Biot-Savartsches Gesetz; Magnetfeld von Helmholtz-Spulen; Unterscheidung von magnetischer Flussdichte „ \vec{B} -Feld“, und magnetischer Feldstärke „ \vec{H} -Feld“ (siehe z.B. Demtröder Bd. 2, Kap. 3.1); physikalische Maßeinheiten von \vec{B} und \vec{H} ; Viskosität; Stokessche Reibung; Cunningham-Korrektur; freie Weglänge; Auftrieb.

Sicherheitshinweise: Für die Beschleunigungsspannung in der Elektronenkanone des Fadenstrahlrohres kommt eine Hochspannung bis 300 V zum Einsatz. An den Kondensatorplatten beim Millikan-Versuch liegt eine Hochspannung von bis zu 600 V an. Verwenden Sie für die Verkabelung nur die dafür vorgesehenen Sicherheitskabel.

Literatur: Jedes Grundkurs-Lehrbuch der Experimentalphysik;
Praktikumslehrbücher: Walcher, Geschke

Geräte: Es werden Fadenstrahlrohre der Firma LD Didactic eingesetzt.
Millikanapparatur der Firma Pasco.
Stabilisierte Netzgeräte mit Spannungsanzeige.

242.1 Spezifische Ladung e/m des Elektrons

242.1.1 Erläuterungen e/m

Prinzip des Fadenstrahlrohrs

Das Fadenstrahlrohr funktioniert folgendermaßen: Aus einem Strahlerzeugungssystem („Elektronenkanone“) bestehend aus Glühkathode, Wehnelt-Zylinder und Anode, tritt ein Elektronenbündel in einen Raum aus, in dem sich Wasserstoff unter einem Druck der Größenordnung ($10^{-2} - 10^{-3}$) mbar befindet. Die Elektronen stoßen mit Gasmolekülen zusammen und ionisieren sie, so dass der Weg des Elektronenbündels durch leuchtende Gasatome (Rekombination) sichtbar gemacht ist. Die beim Stoß erzeugten Sekundärelektronen fliegen aus dem Strahl heraus, während die trägen positiven Ionen zurückbleiben und wegen ihrer großen Anzahl und ihrer geringen Geschwindigkeit eine starke positive Raumladung bilden. Unter der Wirkung dieser Raumladung werden auf die Elektronen des aus dem Strahlerzeugungssystem austretenden Bündels radial zur Strahlachse Kräfte ausgeübt, die eine Fokussierung des Elektronenbündels zur Folge haben. Es bildet sich ein „Knotenstrahl“ oder, unter gewissen Bedingungen, ein fadenförmiger Elektronenstrahl („Fadenstrahl“) aus, der ohne weitere elektronenoptische Hilfsmittel das Entladungsrohr durchläuft.

Bestimmung der spezifischen Ladung e/m des Elektrons

Auf die Elektronen des Strahles wirkt die Lorentz-Kraft

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (242.1)$$

wobei e die Ladung des Elektrons, \vec{v} die Geschwindigkeit des Elektrons und \vec{B} die magnetische Flussdichte ist. Orientiert man das Fadenstrahlrohr im Magnetfeld der Helmholtz-Spulen so, dass der Fadenstrahl die Elektronenkanone senkrecht zur Magnetfeldrichtung verlässt, erhält man als Betrag der Kraft $F = evB$.

Unter der Einwirkung der Lorentz-Kraft wird der Fadenstrahl zu einem Kreisbogen verformt und bei hinreichend starkem Magnetfeld zu einem Vollkreis mit dem Radius r gebogen. Die auf die Elektronen wirkende Lorentz-Kraft F ist dann betragsmäßig gleich der Zentripetalkraft mv^2/r :

$$e \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{r}. \quad (242.2)$$

Die Geschwindigkeit der Elektronen folgt aus dem Energiesatz

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU, \quad (242.3)$$

wobei U die gesamte (Beschleunigung-)Spannung ist, die zwischen Glühkathode und Anode anliegt. Aus Gleichungen 242.2 und 242.3 folgt unmittelbar für die spezifische Ladung des Elektrons

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2}. \quad (242.4)$$

Alle Größen auf der rechten Seite von Gleichung 242.4 werden gemessen. Misst man U in Volt, r in Meter und B in Tesla, so erhält man e/m in Maßeinheiten von As/kg.

Bestimmung der magnetischen Flussdichte im Zentrum der Helmholtz-Spulen

Die Anordnung nach Helmholtz zur Erzeugung homogener Magnetfelder besteht aus zwei einzelnen kreisförmigen Leitern mit gleichen Radien, deren Mittelpunkte auf der gemeinsamen Achse im Abstand ihrer Radien liegen. Die beiden Leiter werden so beschaltet, dass sie von demselben Strom durchflossen werden. Verwendet man statt Einzelleiter Spulen mit größerem Querschnitt, so sind die Abweichungen von der Homogenität klein, wenn man gewisse Bedingungen hinsichtlich des Querschnittes der Spulen beachtet und den Abstand von Spulenmitte zu Spulenmitte gleich dem mittleren Spulenradius macht. Die magnetische Flussdichte im inneren Bereich eines solchen Helmholtz-Spulen-Systems wird mit dem Biot-Savartschen Gesetz berechnet zu

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \mu_0 \frac{n \cdot I}{R} = 0,716 \cdot \mu_0 \frac{n \cdot I}{R}. \quad (242.5)$$

Dabei sind R der mittlere Spulenradius bzw. der Spulenabstand, n die Windungszahl einer Spule ($n = 130$) und I die Stromstärke, die durch die Spulen fließt. Misst man R in m und I in A, so ergibt sich B in Tesla; für μ_0 ist dabei der Wert $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/(Am)} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/(Am)}$ einzusetzen.

242.1.2 Versuchsdurchführung e/m

Das Fadenstrahlrohr (Abb. 242.1) besteht aus einem kugelförmigen Glaskolben mit einem Durchmesser von 160 mm und zwei an gegenüberliegenden Stellen eingeschmolzenen Rohrstutzen. In einem dieser Rohrstutzen sind die Halterungen und Zuführungen für das Strahlerzeugungssystem eingeschmolzen, welches sich im Innern des Kolbens befindet. Die Füllung besteht aus Wasserstoff mit einem Druck von ca. 1 Pa.

Das Fadenstrahlrohr ist in einer Halterung so fixiert, dass die Elektronen senkrecht ins Magnetfeld des – ebenfalls in dieser Haltung montierten – Helmholtzspulenpaares eingeschossen werden. Wenn die Elektronen nicht senkrecht eingeschossen werden, erhält man anstatt einer Kreisbahn einen Schraubenbahn. **Wenn dies der Fall sein sollte, geben Sie bitte Ihrem Assistenten Bescheid, der den Aufbau dahingehend für Sie justiert.** In der Halterung befinden sich die Anschlussbuchsen für das Strahlerzeugungssystem und die Helmholtzspulen mit einem aufgedruckten Schaltschema. Der gesamte Aufbau steht auf einem Drehteller.

Inbetriebnahme und Ausführung von Messungen

Schließen Sie jetzt gemäß des aufgedruckten Schaltschemas das Fadenstrahlrohr an das (gelbe) Röhrennetzgerät an.¹ **Lassen Sie Ihre Verkabelung vor Inbetriebnahme vom Assistenten kontrollieren!** Die Heizspannung (6,3 V ~) wird fest gewählt, während die an das Strahlerzeugungssystem angelegte Beschleunigungsspannung mit Hilfe der im Netzanschlussgerät eingebauten Po-

¹ Gebrauchsanweisung siehe: <https://www.leybold-shop.de/physik/geraete/atom-und-kernphysik/physik-des-elektrons/fadenstrahlrohr/555581.html>

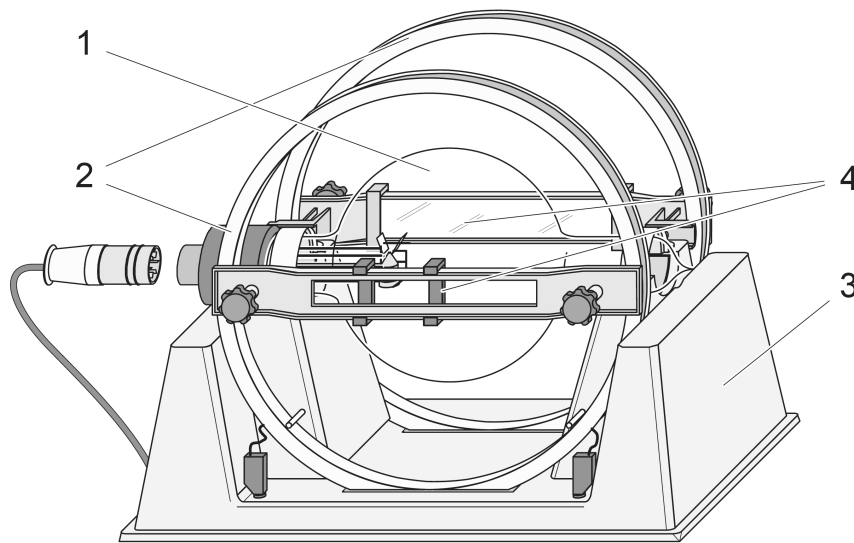


Abbildung 242.1: Fadenstrahlrohr (1) der Firma LD Didactic mit Messvorrichtung (4), die auf einem Ständer (3) mit Helmholtz-Spulen (2) montiert sind.

tentiometer eingestellt werden kann. Mit Hilfe der Spannung am sog. Wehneltzylinder kann der Elektronenstrahl fokussiert werden.

Die Helmholtz-Spulen mit einem Radius und einem Abstand von 150 mm haben jeweils 130 Windungen pro Spule. Schließen Sie diese an das (schwarze) Netzgerät zur Stromversorgung an. Die Spulen dürfen mit einem maximalen Strom von 2 A (kurzzeitig 2,5 A) betrieben werden.

Orientieren Sie den gesamten Aufbau (mit eingerastetem Drehteller) in Nord-Süd-Richtung, so dass Sie die horizontale Komponente des Erdmagnetfeldes später bestimmen können.

Vor der Inbetriebnahme des Fadenstrahlrohres überzeugt man sich davon, dass die beiden Potentiometer für Anodenspannung und Wehnelt-Spannung auf Null stehen. Durch diese Maßnahme vermeidet man, dass beim Einschalten der Heizspannung an Gitter oder Anode des Strahlerzeugungssystems Spannung liegt. Man schließt auf diese Weise mit Sicherheit eine eventuelle Beschädigung der Kathodenschicht während des Anheizvorganges aus.

Erst nach einer Anheizzeit von ca. 3 Minuten betätigt man die beiden Potentiometer und beobachtet nun im gut abgedunkelten Raum das Auftreten des Fadenstrahls. Während man mit dem Potentiometer (0 – 250) V die Höhe der Anodenspannung wählt, lässt sich mit Hilfe des Potentiometers (0 – 50) V die Wehnelt-Spannung geeignet einstellen und damit Schärfe und Helligkeit des Fadenstrahls. Am Einfachsten stellt man die Fokussierung ohne angelegtes Magnetfeld ein, so dass der Elektronenstrahl auf den Glaskolben trifft und dabei das Strahlprofil leicht erkennbar ist.

Wird zwischen den einzelnen Messungen der Elektronenstrahl nicht benötigt, stellen Sie beide Potentiometer wieder auf Null. Durch diese Maßnahme wird die Lebensdauer des Fadenstrahlrohres erheblich verlängert.

Aufgabe 242.a: Experimentelle Bestimmung der spezifischen Ladung:

1. Nach der Anheizzeit (3 Minuten) stellt man den Fadenstrahl geeignet ein und wählt dabei eine bestimmte Beschleunigungsspannung U .

2. Danach schaltet man den Strom durch die Helmholtz-Spulen ein und beobachtet, wie der Fadenstrahl unter der Wirkung des homogenen Magnetfeldes eine Kreisbahn beschreibt.
Zur Bestimmung des Kreisdurchmessers gibt es eine Messvorrichtung bestehend aus einem Lineal mit zwei Schiebern und einem Spiegel zum parallaxefreien Ablesen. Verschieben Sie beim Messen den linken Schieber so, dass Innenkante, Spiegelbild und Austrittsöffnung des Elektronenstrahls auf einer Linie liegen. Den rechten Schieber verschieben Sie bis Innenkante, Spiegelbild und Fadenstrahl ebenfalls auf einer Linie liegen und lesen nun den Durchmesser als Differenz am Lineal ab.
3. Man liest nun den bei der Beschleunigungsspannung U zur Erzeugung eines Vollkreises mit dem Radius r erforderlichen Spulenstrom I am Amperemeter ab.
4. Um die Wirkung des magnetischen Erdfeldes (und anderer ortsfester Störfelder) eliminieren zu können, wird – bei konstant zu haltendem Kreisradius – das Fadenstrahlrohr auf dem Drehteller horizontal um 180° gedreht und dabei der Spulenstrom I so nachgestellt, dass die Elektronen sich wieder auf einer Kreisbahn mit identischem Radius bewegen.
5. Mit einer geänderten Beschleunigungsspannung U wird dieser Messvorgang über einen ausreichenden großen Bereich 10 mal wiederholt. Um einen konstanten Kreisradius bei geänderter Beschleunigungsspannung zu erhalten, kann man den Spulenstrom I nachfahren. Ist das für die Datenanalyse notwendig?

Auswertung

Aufgabe 242.b:

1. Erweitern Sie Gleichung 242.1 um einen Zusatzterm für eine störende magnetische Flussdichte B_E . (B_S sei das durch die Spulen erzeugte Feld, B_E die Komponente des Erdmagnetfeldes in Richtung von B_S).
2. Eliminieren Sie B_E mit den Messungen in beiden Orientierungen des Fadenstrahlrohrs und berechnen Sie B_S aus den Spulendaten und dem Strom I .
3. Stellen Sie die Messdaten in einem Diagramm $(rI)^2$ gegen U dar.
4. Bestimmen Sie mit Hilfe des Diagramms e/m . Geben Sie e/m in C/kg an.
5. Berechnen Sie die Größe von B_E in Tesla.

242.2 Elementarladung e

Die Ladung eines Elektrons, die Elementarladung, soll mit der MILLIKAN²-schen Öltröpfchen-Methode bestimmt werden. MILLIKAN hat als Erster an einem Einzeltropfen gemessen. Er hat nachgewiesen, dass die elektrische Ladung quantisiert ist als ganzzahliges Vielfaches einer Elementarladung e und er hat den Wert von e bestimmt.

² R. A. MILLIKAN, 1868-1953; Phys. Rev. Ser. I, 32, 349-397 (1911); Phys. Rev. Ser. II, 2, 109-143 (1913); Nobelpreis 1923

242.2.1 Erläuterungen e

Mit einem Zerstäuber werden kleine Öltröpfchen erzeugt, die sich in der Regel durch Reibung elektrostatisch aufladen. Wegen der Oberflächenspannung und ihrer Kleinheit haben die Tröpfchen Kugelgestalt. Einige wenige dieser Tröpfchen werden in ein elektrisches Feld (zwischen die Platten eines Kondensators) gebracht, das parallel zur Gravitationsbeschleunigung \vec{g} ausgerichtet ist. Mit der Konvention, dass nach unten gerichtete Kräfte positives Vorzeichen haben, wirken auf einen Öltropfen folgende Kräfte:

1. Die Gravitationskraft, $\vec{F}_g = m\vec{g} = \rho_{\text{Öl}} \frac{4\pi}{3} r^3 \vec{g}$.

Dabei ist $\rho_{\text{Öl}}$ die Massendichte des Öls;
 m die Masse des Tropfens;
 r der Radius des Tropfens.

2. Auftrieb, $\vec{F}_A = -\rho_{\text{Luft}} \frac{4\pi}{3} r^3 \vec{g}$.

Hier ist ρ_{Luft} die Massendichte der Luft, die durch den Öltropfen verdrängt wird. Die Nettokraft aus Gravitation und Auftrieb hängt von der Differenz der Massendichten des Öls und der Luft ab.

3. STOKESSche Reibung, $\vec{F}_R = -6\pi r \eta_{\text{Luft}} \vec{v}$.

Dabei ist \vec{v} die Geschwindigkeit der Kugel und η_{Luft} die Viskosität der Luft.

Frage: Ist hier die dynamische oder die kinematische Viskosität gemeint?

Je nach Summe der externen Kräfte bewegt sich das Teilchen nach oben oder nach unten. Die Richtung der Reibungskraft ist der Geschwindigkeit entgegengesetzt. Die STOKESSche Reibungsformel gilt für die Annahmen der Kontinuumsmechanik, d.h. bei der Wechselwirkung zwischen Fluid und Kugel tritt die Molekülstruktur des Fluid nicht in Erscheinung. Wenn aber der Radius der Kugel in die Größenordnung der freien Weglänge der Moleküle im Fluid liegt oder kleiner ist, wird die Wechselwirkung zwischen Fluid und Kugel zunehmend von der Granularität, d.h. der Molekülstruktur des Fluids bestimmt („Das Öltröpfchen passt ohne Wechselwirkung zwischen die Luftmoleküle“). Unter diesen Umständen überschätzt die STOKESSche Formel die Reibungskraft. Man korrigiert die STOKESSche Formel, indem man die Viskosität der Luft η_{Luft} durch eine effektive Viskosität ersetzt, die in erster Näherung³ durch $\eta_{\text{eff}} = \eta_{\text{Luft}} / (1 + A/r)$ gegeben ist. Der Wert der Konstante A des Korrekturterms ist proportional der freien Weglänge. Bei Bodendruck und für Teilchen größer als 10 μm beträgt die Korrektur weniger als 2% und kann vernachlässigt werden.

Wegen der geschwindigkeitsproportionalen STOKESSchen Reibung erreichen die Öltröpfchen unter der Wirkung von externen Kräften eine Gleichgewichtsgeschwindigkeit (engl. *terminal velocity*). Für die kleinen Öltröpfchen in Luft, die beim MILLIKANversuch benutzt werden, dauert es nach Einschalten des elektrischen Feldes ein paar Millisekunden bis die Endgeschwindigkeit erreicht ist.

4. Elektrostatische Kraft, $\vec{F}_{\text{el}} = q\vec{E}$.

Dabei ist $q = Ne$ die gesamte Ladung auf dem Öltropfen und N die Anzahl der Elementarladungen e . \vec{E} ist das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten. Je nach Polung der Spannung an den Kondensatorplatten ist die Kraft nach oben oder unten gerichtet.

³ Diese Korrektur geht auf CUNNINGHAM zurück

Für den Fall des sinkenden Tröpfchens (v_{\downarrow}) gilt folgendes Kräftegleichgewicht:

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})g - 6\pi\eta_{\text{eff}}rv_{\downarrow} = -NeE, \quad (242.6)$$

und für des steigenden Tröpfchens (v_{\uparrow}) entsprechend

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})g + 6\pi\eta_{\text{eff}}rv_{\uparrow} = +NeE. \quad (242.7)$$

Wenn man beim Experimentieren dieselbe absolute Feldstärke für beide Fälle nutzt, erhält man aus den Gleichungen 242.6 und 242.7 für den Tröpfchenradius

$$r = \sqrt{\frac{9\eta_{\text{eff}}(v_{\downarrow} - v_{\uparrow})}{4g(\rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}})}}, \quad (242.8)$$

und für die Gesamtladung auf dem Tropfen

$$Ne = 3\pi\eta_{\text{eff}}r \frac{v_{\downarrow} + v_{\uparrow}}{E}. \quad (242.9)$$

Aufgabe 242.A: Skizzieren Sie für die beiden Fälle aufsteigendes und fallendes Öltröpfchen die Kraftvektoren, die auf den Tropfen wirken und die Polung der Kondensatorplatten.

242.2.2 Versuchsdurchführung e_0

Wir verwenden die kommerziell erhältliche MILLIKANapparatur der Firma Pasco⁴. Abb. 242.2 zeigt eine Aufsicht der Apparatur und erläutert die wichtigsten Komponenten. Ferner benötigt man ein gut stabilisiertes Netzgerät, das bis zu 500 V Gleichspannung und mindestens 10 mA Strom liefern kann (bei dem verwendeten Netzgerät wird die eingestellte Spannung angezeigt), eine Spannungsversorgung für die Lampe, eine Stoppuhr und Kabel.

- Zur **Vorbereitung** werden die elektrischen Verbindungen (500 V Netzgerät an Buchsen Kondensatorspannung; 12 V Netzgerät an Lampengehäuse) hergestellt. Der Umpolschalter für die Kondensatorspannung wird auf die Mittelstellung („plates grounded“) gebracht; damit sind die Kondensatorplatten von dem 500 V Netzgerät getrennt und miteinander elektrisch verbunden.

Frage: Warum ist dies für die Befüllung der Kondensatorkammer mit Öltröpfchen wichtig?

- Der Schalter für die Zusatzionisation wird in die Mittelstellung („Spray Droplet Position“) gebracht; damit wird ein Entlüftungsloch in der Kondensatorkammer geöffnet durch das Luft aus der Kammer beim Einfüllen der Öltröpfchen entweichen kann. Mit der eingebauten Wasserwaage wird die Apparatur horizontal ausgerichtet.

Frage: Was passiert, wenn die Apparatur NICHT-horizontal ausgerichtet ist?

⁴ Die erste Version wurde Mitte der 1960-er Jahre hergestellt. Die Firma Pasco stellt unter www.pasco.com eine ausführliche Bedienungsanleitung zur Verfügung, die als Ergänzung zu dieser Versuchsbeschreibung nutzbar ist.

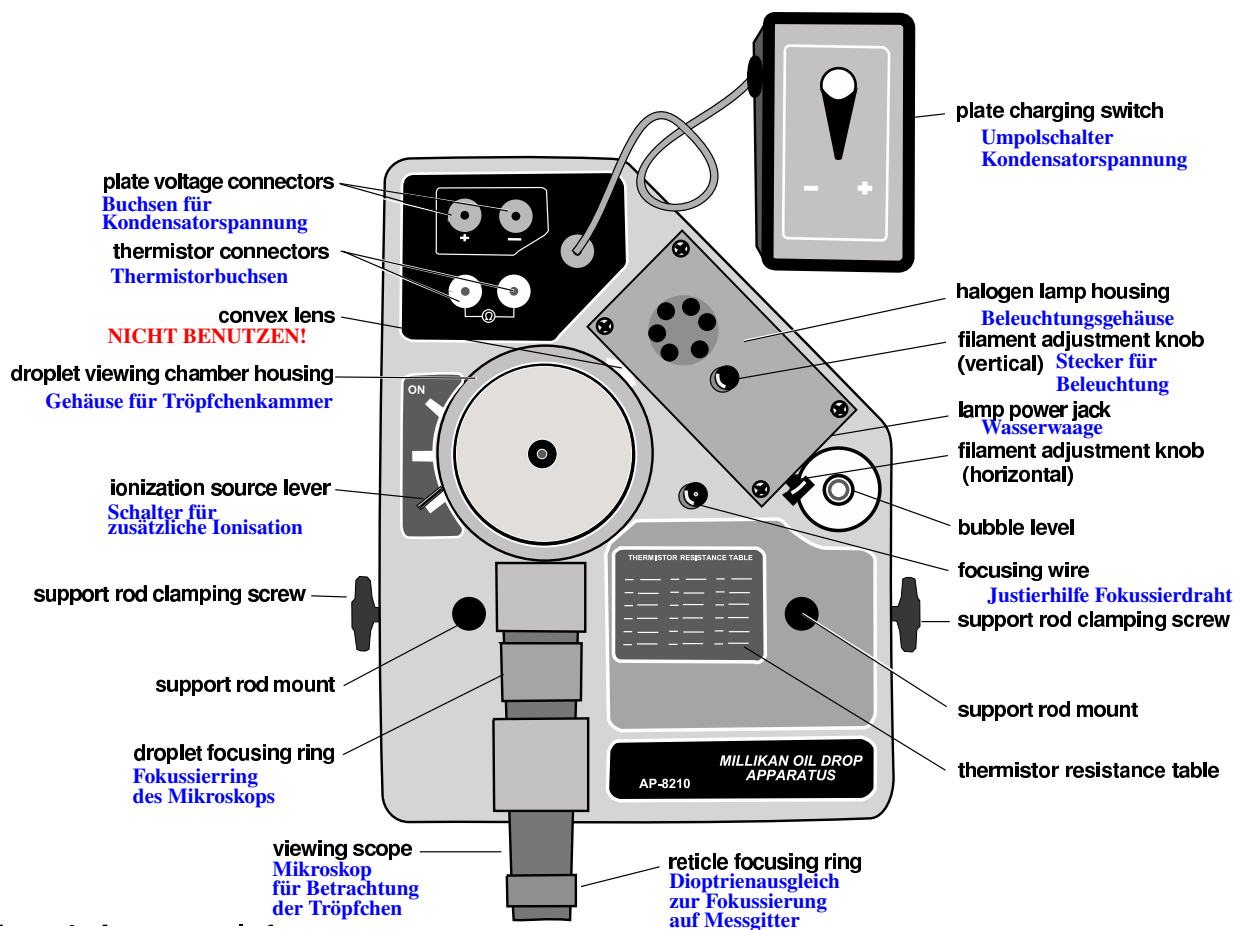


Abbildung 242.2: Aufsicht auf die Millikan-Apparatur

- Das optische System ist zu kontrollieren und ggf. zu justieren. Das Mess- und Beobachtungsmikroskop („viewing scope“) besteht aus Objektiv und Okular. Das Messgitter wird mit dem Okular wie eine Lupe betrachtet, mit dem Dioptrienausgleichsring („recticle focussing ring“) scharf gestellt und so dem individuellen Auge des Beobachters angepasst. Das Objektiv bildet die Öltröpfchen auf ein „Zwischenbild“ im Mikroskop ab; durch Variation des Abstands zwischen Objektiv und der Kombination Okular/Messgitter mit dem Fokusserring („droplet focussing ring“) wird das Messgitter in die Zwischenbildebene gebracht, sodass die Bilder der Öltröpfchen und die Gitterstriche gleichzeitig scharf erscheinen.
- Die Öltröpfchen werden durch ein Loch in der Mitte der kreisförmigen Kondensatorplatten in die Kondensatorkammer geführt. Durch dieses Loch kann man den Fokussierdraht („focusing wire“) als Justierhilfe einführen und als Objekt bei der Justage des Mikroskops nützen. Die optische Achse des Mikroskops ist auf einen geschwärzten Teil der Kondensatorkammer gerichtet. Die Öltröpfchen werden schräg zur optischen Achse beleuchtet und erscheinen als helle Punkte vor einem dunklen Hintergrund (Dunkelfeldbeleuchtung). Die Beleuchtung ist optimal, wenn die rechte Kante des Fokussierdrahtes den höchsten Kontrast zur Drahtmitte

hat (einstellbar am „horizontal filament adjustment knob“) und der Draht am hellsten im Bereich des Messgitters leuchtet (einstellbar am „vertical filament adjustment knob“).

- Wenn noch nicht geschehen, so ist der Schutzdeckel („droplet hole cover“) über dem Einfüllloch in der oberen Kondensatorplatte zu entfernen.

Hinweis: "Weniger ist mehr!" Wenn für das Einbringen des Öls durch das Loch der oberen Kondensatorplatte zu viel bzw. zu häufig gesprüht wird, kann sich das Loch mit Öl zusetzen. (Dann hilft auch kein weiteres Öl mehr!) Wenn Sie also trotz mehrfachen Einsprühens keine Tröpfchen sehen, dann **trennen Sie das Millikan-Gerät von der Stromversorgung**, nehmen die obere Kondensatorplatte heraus und reinigen sie.

Motivation: Das Sichtbarmachen der Tröpfchen gelingt häufig nicht beim ersten Versuch. Üben Sie sich bitte in Geduld.

Aufgabe 242.c: Erste Aufgabe mit der vorbereiteten Apparatur ist es, Öltröpfchen in die Kondensatorkammer zu sprühen. Dazu wird der Gummiball des Zerstäuber vielfach schnell gedrückt, während die Austrittsdüse auf ein Stück Papier gerichtet ist. Wenn auf dem Papier Öl sichtbar wird, kann die MILLIKANSche Apparatur mit Öltröpfchen gefüllt werden. Die Austrittsdüse wird über das Loch im Deckel des Gehäuses der Tröpfchenkammer gehalten und mit nur EINEM Druck auf dem Ball Öltröpfchen in die Öffnung gesprüht. Es ist wichtig, das so wenig Tröpfchen wie möglich in die Kondensatorkammer gelangen, da sonst nicht nur die Identifikation einzelner Tropfen schwierig wird, sondern auch durch die Vielzahl an Tropfen im Beleuchtungsstrahl ein undurchdringlicher Nebel entstehen kann. Wenn dieses Unglück passiert ist, muss man mehrere Minuten warten, bis die Tropfen aus dem Gesichtsfeld sedimentiert sind; u.U. kann man durch Zuschalten des elektrischen Feldes diesen Prozess beschleunigen. Wenn im Gesichtsfeld des Mikroskops helle Öltröpfchen sichtbar sind, wird das Entlüftungsloch geschlossen; dies verhindert den Zutritt weiterer Tröpfchen aus dem Gehäusevolumen oberhalb der Kondensatorkammer. Sicherheitshalber sollte das Eintrittsloch in die Kondensatorkammer in der oberen Kondensatorplatte mit dem schwarzen Stopfen verschlossen werden.

Aufgabe 242.d: Es ist ein für die Messung geeignetes Öltröpfchen zu suchen. Durch Einschalten des elektrischen Feldes in beiden Richtungen werden geladene Tröpfchen identifiziert. Die Endgeschwindigkeit sollte zwischen 0,1 mm/s und 0,01 mm/s liegen. Bewegt sich ein Tröpfchen unter Einfluss des elektrischen Feldes zu schnell, so trägt es wahrscheinlich eine zu hohe Anzahl N von Elementarladungen. Falls kein geeignetes geladenes Teilchen zu finden ist, kann bei abgeschalteten elektrischen Feld die radioaktive Quelle für Zusatzionisation kurz zugeschaltet werden. Teilchen, die zu geringe Masse haben („zu klein sind“), wird durch Molekülstöße eine BROWNSchen Zitterbahn überlagert, sodass die Endgeschwindigkeit nicht bestimmt werden kann.

Aufgabe 242.e: Es ist für den ausgewählten Tropfen die Endgeschwindigkeit zu messen, und zwar sowohl in beiden Feldrichtungen als auch bei abgeschaltetem Feld. Aus den Gleichungen 242.6 und 242.7 kann man ableiten, dass zwischen den drei Geschwindigkeiten die Beziehung

$$2v_0 = v_{\downarrow} - v_{\uparrow} \quad (242.10)$$

Strichabstand Messgitter: Grobeinteilung	0,5 mm
Feineinteilung	0,1 mm
Abstand Kondensatorplatten	steht auf der Apparatur
Massendichte des Öls	886 kg/m ³
Massendichte Luft	1,225 kg/m ³ (bei 15 °C, 1013 hPa)
Dynamische Viskosität von Luft bei 1 atm (nach Kohlrausch):	
bei 0 °C	17,20 µPa s
bei 20 °C	18,19 µPa s
bei 40 °C	19,12 µPa s
(Die Angaben zur Viskosität in der Pasco Anleitung weichen um ca. 0.3% ab)	

Tabelle 242.1: Daten zur MILLIKANapparatur

im Rahmen der Messgenauigkeit gelten muss. Falls dies nicht der Fall ist, hat sich die Anzahl der Ladungen auf dem Öltröpfchen während der Messung geändert und damit ist diese Messung nicht auswertbar. Dokumentieren Sie die Überprüfung dieses Zusammenhangs für Ihre Daten in der Auswertung im Protokollheft.

Aufgabe 242.B: Beweisen Sie Gleichung 242.10.

Aufgabe 242.f: Die Messungen der drei Endgeschwindigkeiten sind an einem Tröpfchen mindestens 5 mal zu wiederholen. Dieses Verfahren wenden Sie bitte für mindestens 10 verschiedene Tröpfchen an.

Hinweis. Falls einzelne Experimente nicht ausreichend Statistik sammeln konnten, dürfen Sie die Daten in der gesamten Praktikumsgruppe zusammen nehmen.

242.2.3 Auswertung e_0

Aufgabe 242.g: Näherungsweise Bestimmung der Gesamtladung auf den Tröpfchen und des Teilchenradius ohne Cunningham-Korrektur: Aus der Zimmertemperatur wird die Viskosität der Luft durch Interpolation der Werte in Tabelle 242.1 bestimmt. Dann wird mit den Gleichungen 242.8 und 242.9 die ungefähre Ladung $q_{S,i}$ und der Radius r_i mit der unkorrigierten STOKESSchen Viskositätsformel (d.h. mit η_{Luft} anstatt mit η_{eff}) aus den gemessenen Geschwindigkeiten für jedes Tröpfchen i berechnet.

Aufgabe 242.h: Bestimmung der Anzahl N_i der Ladungen auf den Tröpfchen: Man suche den größten gemeinsamen Teiler für alle gefundenen Ladungen $q_{S,i}$. Damit kennt man die ganzzahlige Anzahl N_i der Elementarladungen auf jedem Teilchen und erhält so eine Reihe von ungefähren Werten $e_{S,i} = q_{S,i}/N_i$ für die Elementarladung. Tipp: Hierfür kann es nützlich sein, die Daten graphisch aufzutragen.

Aufgabe 242.i: Anbringen der Cunningham-Korrektur: Aus den Gleichungen 242.8 und 242.9 kann man ableiten, dass die unkorrigierten Werte $e_{S,i}$ für die Elementarladungen mit dem korrigiertem Wert e_0 durch

$$e_0 = e_{S,i} \times \left(1 + \frac{A}{r_i}\right)^{-\frac{3}{2}} \quad (242.11)$$

verbunden sind. Umgestellt lautet Gleichung 242.11

$$(e_{S,i})^{\frac{2}{3}} = (e_0)^{\frac{2}{3}} \times \left(1 + \frac{A}{r_i}\right). \quad (242.12)$$

Ein Graph von $(e_{S,i})^{2/3}$ gegen $1/r_i$ ergibt eine Gerade, aus deren Achsenabschnitt man die gesuchte Elementarladung e_0 bestimmt. Der Graph bietet gleichzeitig eine augenfällige Kontrolle, ob man die Anzahl N_i auf den einzelnen Tröpfchen richtig bestimmt hat.

Aufgabe 242.j: Beweisen Sie Gleichung 242.11.

242.3 Masse des Elektrons

Aufgabe 242.k: Berechnen Sie die Masse des Elektrons aus den bestimmten Fundamentalkonstanten e/m und e_0 .