

Versuch 8: Millikan Versuch

Robin Hoffmann*, Arik Bürkle†

12. Dezember 2023

Zusammenfassung

In diesem Versuch werden geladene Öltröpfchen in das elektrische Feld eines Plattenkondensators gebracht, wodurch sich die Öltröpfchen je nach ihrer elektrischen Ladung unterschiedlich bewegen. Dies kann dazu genutzt werden um die Elementarladung zu bestimmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Theorie	1
2.1	Theorie Millikan Versuch	1
2.2	Statistische Fehlerrechnung	2
3	Experiment und Aufbau	2
3.1	Materialien	3
3.2	Aufbau	3
3.3	Durchführung	4
3.4	Vorbereitung	4
3.5	Schwebemethode	4
3.6	Fall-Steig-Methode	5
3.7	Nachbereitung	6
4	Ergebnisse	6
5	Diskussion und Schlussfolgerung	8
6	Literatur	9

*robin.hoffmann@student.uibk.ac.at

†arik.buerkle@student.uibk.ac.at

1 Einleitung

Eine der revolutionärsten naturwissenschaftlichen Entdeckungen des 20. Jahrhunderts war die quantisierte Eigenschaft der elektrischen Ladung. Sie besagt, dass elektrische Ladungen in Paketen, auch Quanten genannt, vorkommt und somit jede elektrische Ladung ein Vielfaches dieses kleinstmöglichen Ladungspakets ist, welches in der Physik Elementarladung genannt wird. Die Elementarladung und die quantisierte Eigenschaft der Ladung konnte dabei erstmals 1910 von dem Physiker Robert Andrews Millikan bei einem Versuch nachgewiesen werden. In diesem Bericht soll es deshalb genau um diesen Versuch gehen, der später nach Robert Andrews Millikan benannt wurde und heute als Millikan Versuch bekannt ist.

Der Millikan Versuch basiert auf Öl Tröpfchen, die sich in einem Plattenkondensator befinden und durch dessen elektrisches Feld abgelenkt werden. Die Bestimmung der Elementarladung kann nun durch zwei verschiedene Messmethoden erfolgen. Die erste Messmethode ist die Schwebemethode, bei dieser Messmethode wird ein Öltröpfchen durch das elektrische Feld zum schweben gebracht wodurch die elektrische Ladung bestimmt werden kann. Bei der zweiten Messmethode handelt es sich um die Fall-Steig-Methode, hierbei wird das Öltröpfchen fallen gelassen und dann durch das elektrische Feld zum steigen gebracht. Aus den gemessenen Fall- und Steiggeschwindigkeiten kann dann die Ladung des Öltröpfchens bestimmt werden.

Im folgenden Bericht wird kurz auf die Grundlagen und die theoretischen Hintergründe des Millikan Versuchs eingegangen. Dannach wird der Aufbau und die Durchführung des Versuchs im Detail beschrieben. Anschließend werden Daten aus einem eigens durchgeführten Experiment mit der Fall-Steigmethode Methode ausgewertet und dann in einem Histogramm als Ergebnisse dargestellt. Durch diese Darstellung wird dann die quantisierte Eigenschaft der Ladung sichtbar und der Wert der Elementarladung kann bestimmt werden.

2 Grundlagen und Theorie

Dieser Abschnitt dient dazu, die grundlegenden physikalischen Gesetze und Formeln, die bei dem Millikan Versuch von Relevanz sind, aufzuzeigen. Außerdem wird auf die verwendeten Methoden der statistischen Analyse und im Speziellen auf die Fehlerrechnung eingegangen.

Der Millikan Versuch funktioniert größtenteils durch ein Kräftegleichgewicht. Das Kräftegleichgewicht sorgt dafür das die Öltröpfchen nicht beschleunigt werden und sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen.

2.1 Theorie Millikan Versuch

Auf das Öltröpfchen wirken hierbei primär die Schwerkraft sowie die Auftriebskraft.

$$F_{G,A} = (\rho_{\text{Ö}} - \rho_L) \cdot V \cdot g \quad (1)$$

Bewegt sich der Tropfen nun, so wirkt die Reibungskraft der Bewegung entgegen, diese kann durch die stoksche Reibung modelliert werden. Im Zuge dessen entsteht bei konstanter Geschwindigkeit folgendes Kräftegleichgewicht:

$$(\rho_{\ddot{O}} - \rho_L) \cdot V \cdot g = 6\pi r \eta v_1 \quad (2)$$

Aus diesem Kräftegleichgewicht lässt sich nun der Radius des Öltröpfchens bestimmen, mit welchem im nächsten Schritt dann die Ladung des Öltröpfchens bestimmt werden kann:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_1}{2(\rho_{\ddot{O}} - \rho_L) \cdot g}} \quad (3)$$

Wird die Spannung am Plattenkondensator eingeschaltet wirkt zusätzlich eine elektrische Kraft, welche dafür sorgt, dass sich das Öltröpfchen nach oben bewegt.

$$F_{el} = Q \cdot \frac{U}{d} \quad (4)$$

Es entsteht ein Kräftegleichgewicht zwischen F_{el} und $F_R + F_{G,A}$, aus welchem man die Ladung Q des Öltröpfchens bestimmen kann:

$$Q = [(\rho_{\ddot{O}} - \rho_L) \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 g + 6\pi r \eta v_2] \cdot \frac{d}{U} \quad (5)$$

Bei der Schwebemethode entsteht ein Kräftegleichgewicht zwischen F_{el} und $F_{G,A}$ wodurch Q etwas anders bestimmt wird.

$$Q = (\rho_{\ddot{O}} - \rho_L) \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 g \cdot \frac{d}{U} \quad (6)$$

Aus beiden Messmethoden kann man somit die Ladung des Tropfens berechnen. Jedoch nur unter der Annahme, dass das Gesetz der stokschen Reibung gilt. Da bei diesem Versuch die Größe der Öltröpfchen sehr klein ist gilt die stoksche Reibung in diesem Fall nicht. Um diesen Fehler zu beheben wird mit einem zusätzlichen Korrekturfaktor gerechnet. Dieser Korrekturfaktor kann mit einer linearen Regression bestimmt werden, wobei die lineare Regression aus folgender Gleichung entsteht:

$$Q^{\frac{2}{3}} = Q_k^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 + \frac{b}{r \cdot \rho}\right) \quad (7)$$

Dabei ist Q_k die korrigierte Ladung der Öltröpfchen und ρ der Luftdruck.

2.2 Statistische Fehlerrechnung

In diesem Bericht wird zur Bestimmung der Fehlerwerte die gaußsche Fehlervortpflanzung verwendet, welche für alle bestimmten Größen mittels des Python uncertainties-Packges berechnet wurden.

3 Experiment und Aufbau

Im Folgenden wird der Aufbau des Millikan Versuchs mit allen zugehörigen Materialien und Geräten beschrieben. Sowie die genau Durchführung des Experiments erleutert:

3.1 Materiallien

Die benötigten Materiallien für den Millikan Versuch sind:

- Plattenkondensator (Plattenabstand $d = 6 \text{ mm}$)
- Verstellbare Spannungsquelle
- Spannungsmessgerät mit synchronisierter Stoppuhr
- Behälter mit Öl
- Zerstäuber
- Messmikroskop (Vergrößerung 0,1 mm)
- Beleuchtungseinrichtung
- Stativfuß

3.2 Aufbau

In Abbildung 1 kann der genau Aufbau des Millikan Versuchs betrachtet werden. Der zugehörige

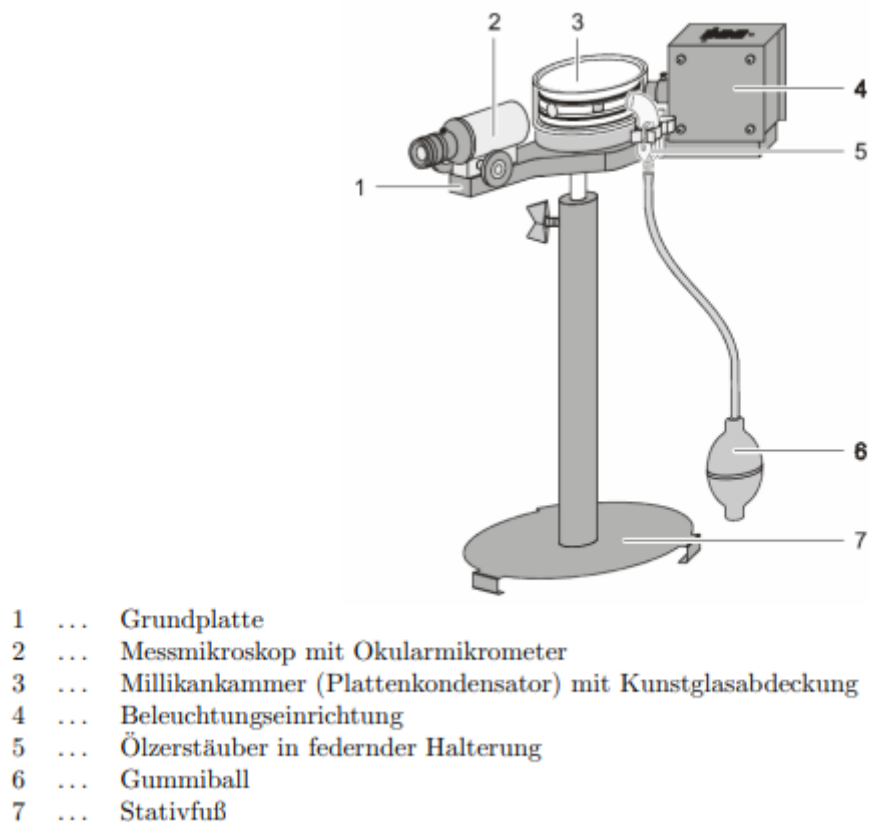


Abbildung 1: Versuchsaufbau des Millikan Versuchs zur Bestimmung der Elementarladung. Schematische Darstellung und Beschreibung der einzelnen Bauteile des Millikan-Geräts.

Schaltplan des Plattenkondensators ist dabei in Abbildung 2 dargestellt.

Da eine exakte Zeitmessung nötig ist, um später richtige Ergebnisse zu erhalten wird außerdem ein Spannungsmessgerät mit synchronisierter Stoppuhr verwendet. Die Funktionalität dieses Geräts ist dabei in Abbildung 3 beschrieben.

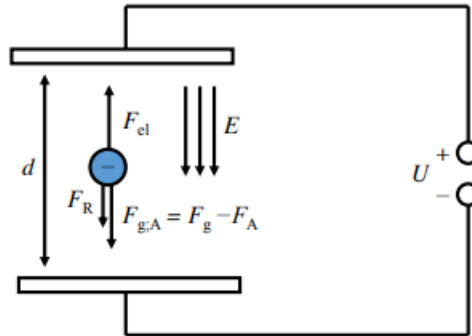


Abbildung 2: Schaltplan der Anordnung des Millikan Versuchs mit eingezeichneten Kräften. Es werden hierbei negative Teilchen betrachtet die von der positiv geladenen Kondensatorplatte angezogen werden.

3.3 Durchführung

In diesem Kapitel soll die genau Durchführung des Millikan Versuchs Schritt für Schritt erleutert werden. Dabei wird zwischen der Schwebemethode und der Fall-Steig-Methode zur Bestimmung der Elementarladung unterschieden.

3.4 Vorbereitung

Der erste Schritt besteht in der Überprüfung der Funktionalitäten der benötigten Geräte für den Millikan Versuch. Des Weiteren sollte sich vor Beginn des Versuchs mit den verschiedenen Geräten vertraut gemacht werden. Danach kann mit dem Ölzerstäuber Öltröpfchen in die Millikankammer gegeben werden. Das Messmikroskop sollte dann so eingestellt werden, dass die Öltröpfchen für den Versuch gut erkennbar sind. Es ist hierbei zu beachten, dass das Mikroskop die Sicht spiegelt, das heißt ist keine Spannung angelegt sollten sich die Öltröpfchen durch die Schwerkraft nach oben bewegen. Nun muss sich für eine der zwei Messmethoden entschieden werden, wobei wir in diesem Bericht unsere Daten mit der Fall-Steig-Methode ermittelt haben. Die Fall-Steig-Methode ist dabei etwas ungenauer, jedoch einfacher in der Durchführung.

3.5 Schwebemethode

Bei der Schwebemethode wird nach dem Einsprühen der Öltröpfchen ein Öltröpfchen gewählt, welches sich in der Gleichgewichtslage halten lässt. Hierzu wird die Spannung mit dem Schalter U (7 in Abbildung 3) aktiviert und dann mit dem Drehknopf (1 in Abbildung 3) variiert bis das Öltröpfchen in der Gleichgewichtslage still steht. Ist das Öltröpfchen in einer stabilen Gleichgewichtslage kann durch erneutes betätigen des Schalters U (7 in Abbildung 3) die Spannung wieder deaktiviert werden. Passiert das Öltröpfchen nun eine Messmarkierung muss der Schalter t (6 in

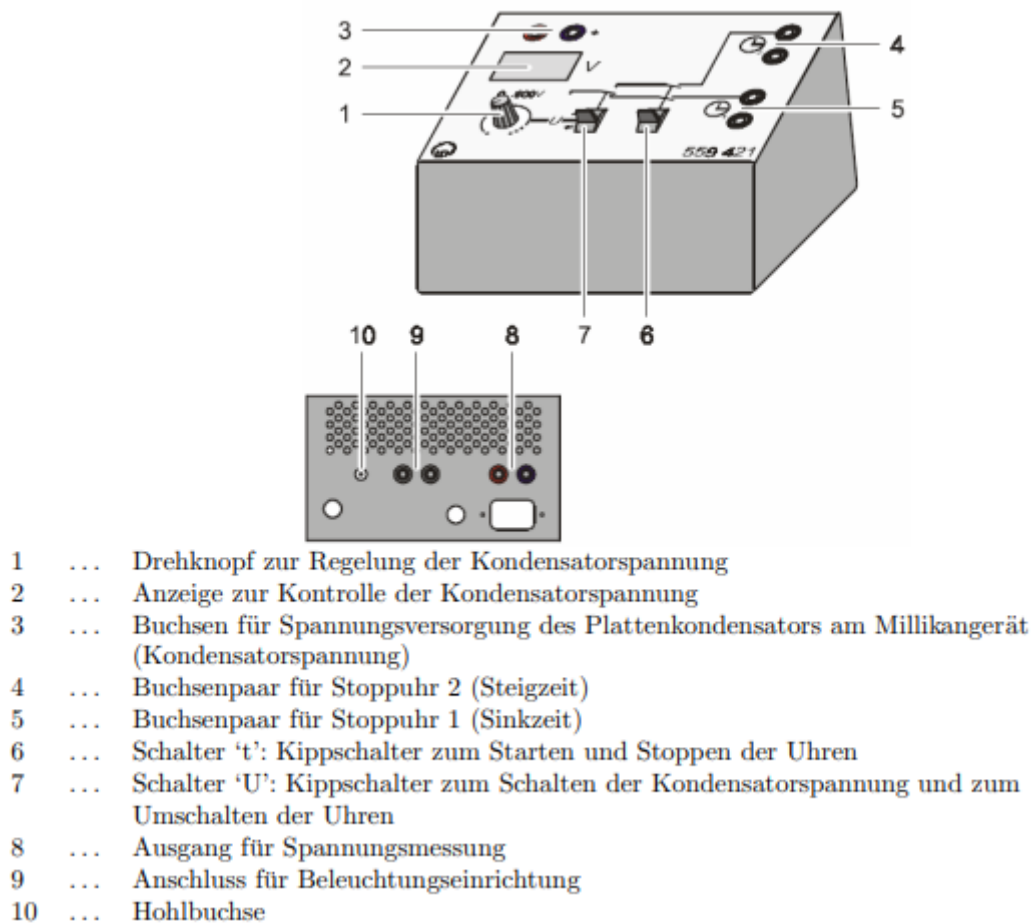


Abbildung 3: Schematische Darstellung und Beschreibung des Spannungsmessgeräts mit synchronisierter Stoppuhr zur Zeitmessung des Millikan Versuchs⁵⁰.

Abbildung 3) aktiviert werden, um die Zeitmessung zu starten. Das Teilchen bewegt sich nun nach oben, da nurnoch die Gewichtskraft wirkt, welche nicht mehr durch die elektische Kraft des elektrischen Feldes ausgeglichen wird. Als nächstes soll die Zeitmessung durch erneutes betätigen des Schalter t (6 in Abbildung 3) gestoppt werden, genau dann wenn das Teilchen einen nachvollziehbaren Distanz auf der Skala des Messmikroskops zurückgelegt hat. Dabei entsteht durch die menschliche Reaktionszeit ein Messfehler von $\delta t = 0,2\text{s}$. Außerdem entsteht eine Ablesungenauigkeit von $\delta s = 0,025\text{mm}$. Zuletzt muss nun die verwendete Spannung, sowie die ermittelte Fallzeit und Falldistanz festgehalten werden.

3.6 Fall-Steig-Methode

Bei der Fall-Steig-Methode wird auch nach dem Einsprühen der Öltröpfchen zuerst ein Öltröpfchen gewählt. Dieses Öltröpfchen sollte die Eigenschaft haben sich ohne angelegte Spannung nach oben und bei angelegter Spannung nach unten zu bewegen. Hierbei sollten beide Bewegungen gut erkennbar sein und nicht zu schnell erfolgen um eine genau Messung zu garantieren. Wurde ein passendes Öltröpfchen gefunden soll die Bewegung nach oben verfolgt werden, befindet sich das

Öltröpfchen nun an einem auf der Skala des Messmikroskops nachvollziehbaren Ort ist die Zeitmessung mit dem Schalter t (6 in Abbildung 3) zu starten. Passiert das Öltröpfchen nun einen zweiten nachvollziehbaren Ort auf der Skala des Messmikroskops muss mit dem Schalter U (7 in Abbildung 3) die Spannung aktiviert werden. Das Öltröpfchen ändert daraufhin seine Richtung und bewegt sich wieder zurück nach unten. In dem Moment, indem es den Ort passiert, an dem die Zeitmessung gestartet wurde, muss die Zeitmessung durch erneutes betätigen des Schalter t (6 in Abbildung 3) gestoppt werden. Hierbei entsteht wieder durch die menschliche Reaktionszeit für beide gemessenen Zeiten ein Fehler von $\delta t = 0,2\text{ s}$ und durch die Ablesungenauigkeit ein Fehler für die Strecke von $\delta s = 0,025\text{ mm}$. Zuletzt muss nun die verwendete Spannung, sowie die ermittelte Fallzeit, Steigzeit und Falldistanz festgehalten werden.

3.7 Nachbereitung

Nachdem eine Messung durchgeführt wurde, dass heißt die Daten von einem Öltröpfchen erfasst wurden, ist auf einige Fehlerquellen zu achten. Zum einen sollte die Zeitmessung zurückgesetzt werden und die Spannung deaktiviert werden, um den Start der nächsten Messung ohne Komplikationen einzuleiten. Außerdem sollte der Ölzerstäuber erneut betätigt werden, sodass auf jeden Fall ein neues Tröpfchen für die nächste Messung benutzt wird. Während der Messung sollte man bei beiden Messmethoden das ausgewählte Öltröpfchen gut im Blick behalten, damit es zu keiner Verwechslung kommt, welche die ermittelten Daten verfälschen könnte.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse nach der Durchführung des Millikan Versuches besprochen. Dazu werden aus den gemessenen Zeiten die Radien und die Ladungen der Öltröpfchen bestimmt, und dann in einem Histogramm dargestellt. Aus den Differenzen der Ladungsgruppen kann man dann die Elementarladung bestimmen.

Die für die Auswertung verwendeten Daten stammen aus der gesamten Labor Gruppe und sind in Form einer Exceltabelle im Anhang des Berichts zu finden. Zur Auswertung des Versuchs werden die Datenwerte von 41 bis 80 der Exceltabelle ausgelassen da diese Wert weit von den anderen gemessenen Daten abweichen und deshalb vermutet wird, dass dort ein systematischer Fehler den Versuch verfälscht hat.

Aus den gemessenen Fall- und Steiggeschwindigkeiten lässt sich nun der Radius und die Ladung des jeweiligen Öltröpfchens berechnen. Die entstandenen Öltröpfchen haben dabei einen Radius von ungefähr $r \approx 0,5\text{ }\mu\text{m}$. Die Größenordnung dieser Radien ist so klein das die stokesche Reibung keine gute Annäherung mehr für die wirklich wirkende Reibung ist.

In Abbildung 4 ist die Ladungsverteilung der ermittelten Daten dargestellt, dabei können unterschiedliche Ladungsgruppen anhand der verschiedenen Peaks der Daten erkannt werden. Die erste Ladungsgruppe trägt dabei Ladungen von $Q_1 = 1,3 \cdot 10^{-19}\text{ C} - 2,5 \cdot 10^{-19}\text{ C}$. Die zweite Ladungsgruppe trägt Ladungen von $Q_2 = 3,2 \cdot 10^{-19}\text{ C} - 4,3 \cdot 10^{-19}\text{ C}$. Weitere Ladungsgruppen lassen sich leider nur grob erahnen, da die Anzahl der Messdaten für diese Ladungsgruppen stark abnehmen. Aus diesem Grund beschränkt sich diese Auswertung auf die ersten beiden Ladungsgruppen. Für die erste Ladungsgruppe entsteht ein Mittelwert von $Q_1 = 2,0(2) \cdot 10^{-19}\text{ C}$

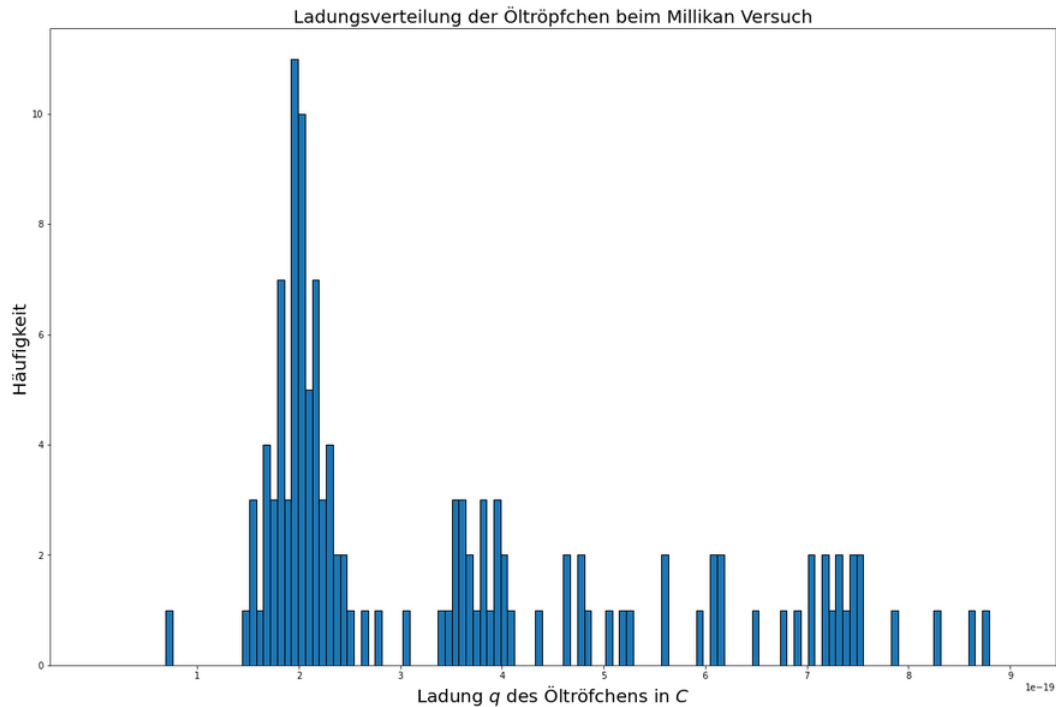


Abbildung 4: Die Grafik beschreibt die Häufigkeit von verschiedenen Ladung in Form eines Balkendiagramms mit der Balkendicke $d = 0,07 \cdot 10^{-19} \text{ CI}$

und für die zweite Ladungsgruppe ein Mittelwert von $Q_2 = 3,7(2) \cdot 10^{-19} \text{ C}$, wobei der Fehler hierbei durch die Standardabweichung des jeweiligen Mittelwerts beschrieben wird. Daraus folgt ein Abstand der beiden Ladungsgruppen von $e = 1,8(3) \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Um die Abweichung der Reibung zu korrigieren kann nun mit Hilfe eines Korrekturfaktors gerechnet werden. Dabei handelt es sich um eine Ausgleichsgerade welche in Abbildung 5 dargestellt ist. Mit dieser erhalten die Ladungswerte der ersten und zweiten Ladungsgruppe eine korrigierte Ladung. Aus dem Y-Achsenabschnitt des linearen Fits lässt sich die korrigierte Ladung ablesen welche bei der ersten Ladungsgruppe die Ladung auf $Q_{k1} = 1,9(2) \cdot 10^{-19} \text{ C}$ und bei der zweiten Ladungsgruppe auf $Q_{k2} = 3,4(2) \cdot 10^{-19} \text{ C}$ korrigiert. Aus diesen beiden Werten kann man nun wieder eine Differenz der Ladungsgruppen bilden, wodurch man einen korrigierten Wert für die Elementarladung erhält von $e = 1,5(3) \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Dabei ist die Korrekturkonstante $b = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{m}$.

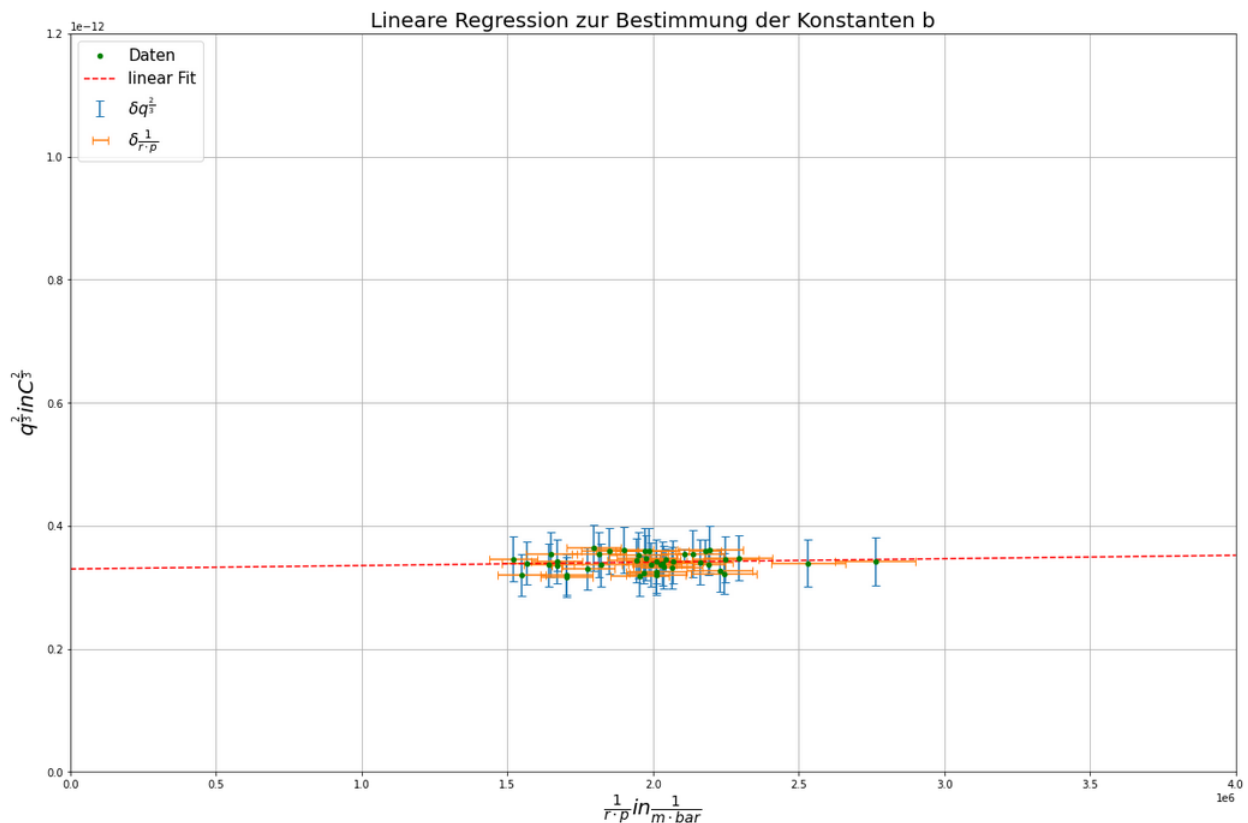


Abbildung 5: Der Graph zeigt eine Lineare Regression zwischen $\frac{1}{r \cdot \rho}$ und Q^2 mit der Funktion $y = a + bx = 3,3 \cdot 10^{-13} + 5,5 \cdot 10^{-21}x$ für die erste Ladungsgruppe.

5 Diskussion und Schlussfolgerung

In diesem Versuch sollte durch Öltröpfchen im Millikan Kondensator die Existenz und der Wert der Elementarladung bestimmt werden. Dazu wurde in diesem Bericht die Sink-Steig-Methode des Millikan Versuchs verwendet, durch die eine Elementarladung von $e = 1,54 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ermittelt wurde. Der dazugehörige Literaturwert liegt bei $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, von diesem haben wir eine Abweichung von $0,1 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, was in dem Fehlerbereich unserer gemessenen Ladung liegt. Auch der unkorrigierte Wert von $Q = 1,8(3) \cdot 10^{-19} \text{ C}$ hat einen Fehlerbereich, welcher die Elementarladung enthält. Somit konnte die Elementarladung bei diesem Versuch gefunden werden. Es sind jedoch deutlich mehr Messungen nötig, um ein exaktes Ergebnis zu erzielen, dennoch haben wir eine gute Abschätzung für die Elementarladung erhalten. Aus den Versuchsergebnissen geht dennoch eine eindeutige Quantisierung der Ladung hervor, welche man an den unterschiedlichen Ladungsgruppen im Histogramm (Abbildung 4) erkennen kann.

Die Korrekturkonstante b entspricht nur der Hälfte von dem im Skript angegebenen Wert ($b = 8 \cdot 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{m}$) und deutet auf eine fehlerhafte Korrektur hin.

Probleme bei der Messung entstanden vor allem durch nahe beieinander liegende Öltröpfchen, die leicht verwechselt werden konnten, wodurch die gemessenen Zeiten nicht mehr den passenden Öltröpfchen zugeordnet werden konnten. Dies hatte stark verfälschte Messwerte zur Folge, welche im Histogramm als einzelne Balken zu erkennen sind.

Da man bei diesem Versuch zuerst überprüft, ob sich die Öltröpfchen überhaupt bewegen, kommt

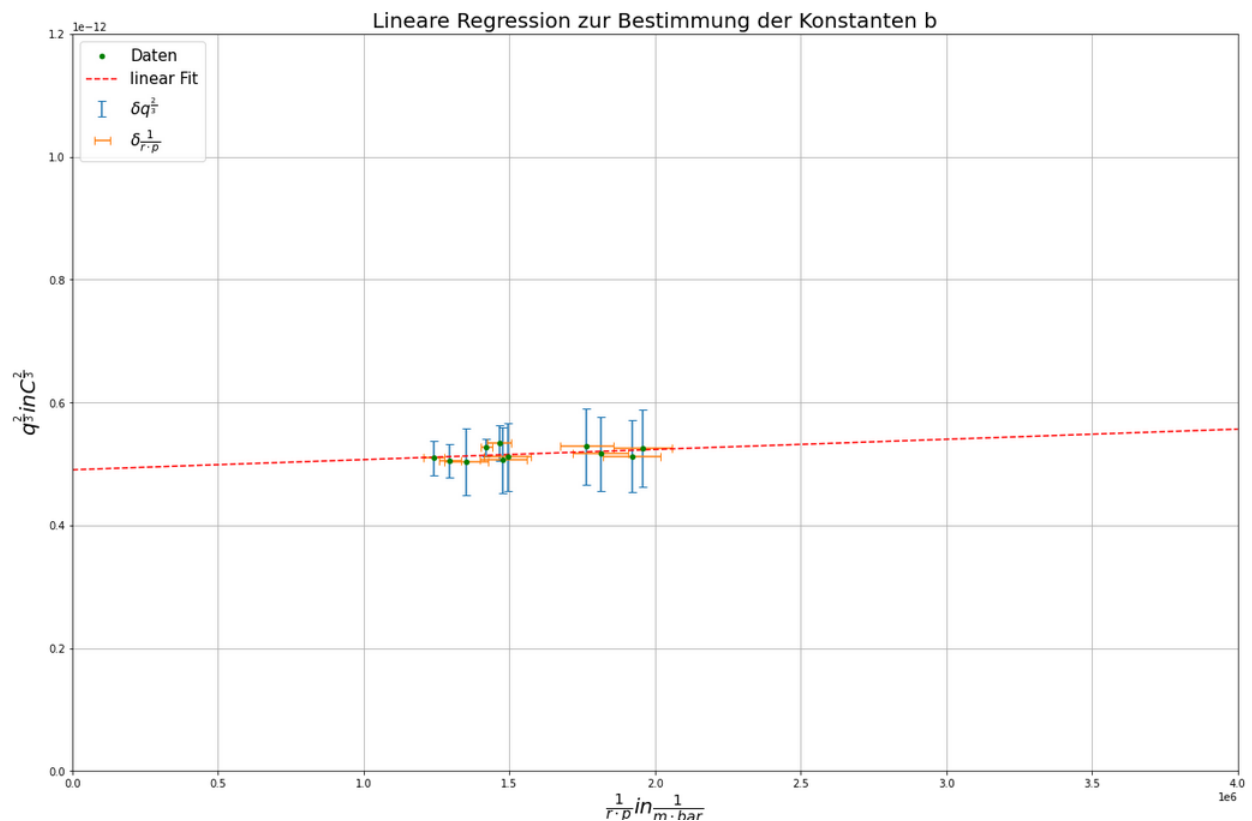


Abbildung 6: Der Graph zeigt eine lineare Regression zwischen $\frac{1}{r \cdot \rho}$ und $Q^{\frac{2}{3}}$ mit der Funktion $y = a + bx = 4,9 \cdot 10^{-13} + 1,7 \cdot 10^{-19}x$ für die zweite Ladungsgruppe.

es leicht dazu das schnelle Öltröpfchen ausgewählt werde, da diese durch ihre schnelle Bewegung sehr auffällig sind. Bei diesen schnellen Öltröpfchen ist es schwieriger die Zeitmessung exakt durchzuführen, wodurch ein systematischer Fehler entsteht, der schwer nachzuvollziehen ist.

6 Literatur

- Lehrkräfte des Instituts für Experimentalphysik (2019), Grundpraktikum 2: Millikan Versuch - Unniversität Innsbruck

Erklärung

Hiermit versichern wir, dass der vorliegende Bericht selbständig verfasst wurde und alle notwendigen Quellen und Referenzen angegeben sind.

Arik Bürkle
Student 1

21.03.2023
Datum

Robin Hoffmann
Student 2

21.03.2023
Datum