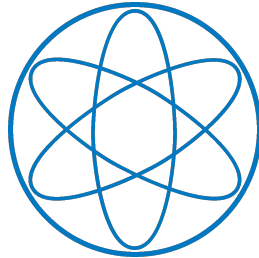


Anfängerpraktikum Teil 2

(Thermodynamik und Elektrodynamik)

Eigenschaften des Elektrons



Kurs 3, Gruppe 4, Team 11:

Michael Labenbacher

Marius Straßner

Fakultät für Physik

Technische Universität München

1. Einleitung	1
2. Spezifische Elektronenladung	1
2.1. Verwendete Methoden	1
2.2. Experimentelles Vorgehen	2
2.3. Ergebnisse und Diskussion	3
3. Millikan-Versuch	4
3.1. Verwendete Methoden	4
3.2. Experimentelles Vorgehen	5
3.3. Ergebnisse und Diskussion	5
4. Elektronenmasse	7
Anhang	8
A. Messergebnisse und Fehlerrechnung	8
A.1. Spezifische Elektronenladung	8
A.2. Millikan-Versuch und Elektronenmasse	10
B. Literaturverzeichnis	13

Dienstag 14. August, 2018

1. Einleitung

Das Ziel dieses Versuches ist die Bestimmung der Masse und Ladung des Elektrons, wobei die Berechnungen nicht-relativistisch erfolgen und Ergebnisse von anderen, parallel arbeitenden Gruppen herangezogen werden.

2. Spezifische Elektronenladung

2.1. Verwendete Methoden

Grundlage dieses Versuches ist die Beschleunigung und Ablenkung von Elektronen. Durchläuft ein zu Beginn ruhendes Elektron mit Ladung $q = -e$ und Masse m_e die Beschleunigungsspannung U_B , so gewinnt es, bei nicht-relativistischer Betrachtung, die kinetische Energie

$$T = q \cdot U_B = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (2.1)$$

Die mittlere kinetische Energie eines Teilchens bei f Freiheitsgraden

$$T = \frac{f}{2} k_B T \quad (2.2)$$

ist der Temperatur proportional.

Eine überschlagsmäßige Rechnung mit $U_B = -300 \text{ V}$ und den Literaturwerten in Tabelle 2.1 ergibt nach Umstellen von Gleichung (2.1) eine Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{2 \frac{q}{m_e} U_B} \approx 0.034c < 0.1c,$$

was die Rechenmethode rechtfertigt. Des Weiteren wird die thermische Energie vernachlässigt. Fordert man eine Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen von $< 1 \%$ der berechneten Endgeschwindigkeit so müsste die Temperatur T bei Betrachtung eines Freiheitsgrades $f = 1$

$$T < \frac{2 \cdot q \cdot U_B}{f \cdot k_B} \cdot 0.01^2 = 232 \text{ K}$$

liegen. Dies liegt weit unter der Kathodentemperatur von $T \approx 1300 \text{ K}$ und verursacht eine Unsicherheit in der Geschwindigkeit. Dies mittelt sich aber statistisch raus und verändert die Breite des Elektronenstrahls.

Im zweiten Teil wird das auf v beschleunigte Elektron mit Hilfe eines konstanten, homogenen Magnetfeldes B abgelenkt. Sind \vec{v} und \vec{B} senkrecht zueinander, so ist die Lorentzkraft

$$F_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \stackrel{Vor.}{=} qvB = m_e \frac{v^2}{r} \quad (2.3)$$

eine Zentripetalkraft. Dabei ist r der Radius des Kreises. Die Voraussetzungen für das Magnetfeld können mit Hilfe eines Helmholtz-Spulenpaars, unter guter Näherung erfüllt werden. Dabei handelt es sich um zwei identische Spulen mit Radius R und Windungszahl N , die im Abstand R zueinander platziert sind. Sind die Abmessungen der Spulenwicklung (Länge, Radienverhältnis) klein gegenüber dem Radius, so können die beiden Spulen durch einzelne „Stromfäden“ genähert werden. Mit dem Biot-Savart-Gesetz [1] und einer relativen Permeabilität $\mu_r \approx 1$ erhält man auf der Symmetrieachse

$$\begin{aligned} \vec{B}(x) &= \frac{\mu_0 R^2 IN}{2} \left[\frac{1}{\left(R^2 + \left(x + \frac{R}{2}\right)^2\right)^{3/2}} + \frac{1}{\left(R^2 + \left(x - \frac{R}{2}\right)^2\right)^{3/2}} \right] \cdot \vec{e}_x \\ &\stackrel{Taylor}{=} \mu_0 \frac{IN}{R} \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \vec{e}_x + \mathcal{O}(x^4) \vec{e}_x \approx \mu_0 \frac{IN}{R} \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \vec{e}_x = \vec{B} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dadurch kann im Zentrum der beiden Spulen ein relativ großräumiges, homogenes Magnetfeld B erzeugt werden. Mit den Gleichungen (2.4), (2.3) und (2.1) lässt sich nun ein Zusammenhang zwischen der spezifischen Elektronenladung $-e/m_e$ und den messbaren Größen (Strom und Spannung) schaffen:

$$-\frac{e}{m_e} = \frac{2U_B}{B^2 \cdot r^2} = \frac{2U_B \cdot R^2}{\mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2 \cdot r^2} \cdot \left(\frac{5}{4}\right)^3 \quad (2.5)$$

Tabelle 2.1.: Literaturwerte [3]

m_e	Elektronenmasse	$9.109\,383\,56(11) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
e	Elementarladung	$1.602\,176\,620\,8(98) \cdot 10^{-19} \text{ A s}$
$-e/m_e$	spezifische Elektronenladung	$-1.758\,820\,024(11) \cdot 10^{-11} \text{ A s/kg}$
k_B	Boltzmannkonstante	$1.380\,648\,52(79) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
c	Lichtgeschwindigkeit	$299\,792\,458 \text{ m/s}$

2.2. Experimentelles Vorgehen

Die Versuchsanordnung besteht aus einem Helmholtzspulenpaar, welches mit einem Strommessgerät (VC130) an eine regelbare Stromquelle angeschlossen ist. Die Spulen mit je $N = 130$ Windungen haben einen Abstand und Radius von $R = (150.0 \pm 2.0) \text{ mm}$. Zwischen den Spulen ist ein mit Neongas befüllter Glaskolben befestigt. In diesem befindet sich eine Elektronenkanone bestehend aus einer Glühkathode, Wehneltzylinder und Lochanode, welche mit einem Netzgerät verbunden und geregelt werden können. Für die Messung relevant ist dabei nur die Beschleunigungsspannung, die deshalb mit einem Multimeter (VC120) gemessen wird. Wehnelt- und Heizspannung werden aus diesem Grund lediglich nach Augenmaß eingestellt um

einen möglichst fokussierten Elektronenstrahl zu erreichen, wobei darauf zu achten ist, dass sich der Radius r dadurch nicht merklich ändert.

Spulenstrom und Beschleunigungsspannung werden anschließend so eingestellt, dass sich der Elektronenstrahl zu einem Kreis schließt. Sein Durchmesser kann an den Metallmarkierungen im Kolben abgelesen werden. Für die Radien 30, 40 und 50 mm mit je einer systematischen Unsicherheit von $\Delta r = 0.5 \text{ mm}$ [1] werden jeweils einmal bei konstantem Spulenstrom $I = (1.30 \pm 0.13) \text{ A}$ die Beschleunigungsspannung (Messreihe 1) und einmal bei fester Beschleunigungsspannung $U = (119.9 \pm 0.8) \text{ V}$ der Spulenstrom (Messreihe 2) ermittelt, wobei jede Messung zehn mal wiederholt wird.

2.3. Ergebnisse und Diskussion

Die Messwerte von der Strom- und Spannungsmessung finden sich im Anhang in Tabelle A.1 und A.2. Mit der Formel (2.5) lässt sich nach Mittlung der Werte jeweils das Ladungs-Masse-Verhältnis bestimmen und die Ergebnisse finden sich in Tabelle 2.2. Fehlerrechnung ist dem Abschnitt A.1 zu entnehmen.

Tabelle 2.2.: Spezifische Elektronenladung für die Messreihe 1 bei konstantem Strom und 2 bei konstanter Spannung

Messreihe:	1	2
r	$-e/m_e$	$-e/m_e$
mm	A s/kg	A s/kg
30	1.7 ± 0.5	1.69 ± 0.20
40	1.7 ± 0.4	1.99 ± 0.22
50	1.7 ± 0.4	1.76 ± 0.19

Im Toleranzbereich der Unsicherheiten stimmen die Werte überein und eine gewichtete Mittlung führt auf $-e/m_e = (1.78 \pm 0.11) \cdot 10^{-11} \text{ A s/kg}$. Dies entspricht im Rahmen der Unsicherheiten dem Literaturwert von $-1.758\,820\,024(11) \cdot 10^{-11} \text{ A s/kg}$ (Tabelle 2.1), womit das Ergebnis als realistisch eingestuft werden kann. Die angegebenen Messunsicherheiten resultieren zum größten Teil aus den Unsicherheiten der verwendeten digitalen Multimeter.

Relativistische Effekte wurden, wie in Abschnitt 2.1 erläutert nicht mit einbezogen und ebenfalls unberücksichtigt musste die thermische Energie der Elektronen bleiben, wobei durch die Dicke des Elektronenstrahls ein statistischer Anteil durch die Mehrfachmessungen davon abgehandelt wurde.

Mögliche Inhomogenitäten vom Magnetfeld blieben unberücksichtigt, da keine Werte bekannt sind, jedoch beschreibt Gleichung (2.4) ein relativ homogenes Feld. Der äußere Einfluss vom Erdmagnetfeld lässt sich in zwei Teile zerlegen. Die Komponente in Richtung des von der Spule erzeugten Magnetfeldes stärkt oder schwächt dieses und ändert somit den Radius zum Großteil systematisch. Berücksichtigt man aber, dass bei den verwendeten Stromstärken in der Nähe von $I = 1.3 \text{ A}$ die Flussdichte $B \approx 1 \text{ mT}$ beträgt und vergleicht dies mit der Komponente des Erdmagnetfelds im $10 - 50 \text{ }\mu\text{T}$ -Bereich, so macht sich dies im Vergleich zu den vorhandenen Fehlerquellen kaum bemerkbar.

3. Millikan-Versuch

3.1. Verwendete Methoden

Nach [1] wirken auf ein geladenes Öltröpfchen, das sich im Gravitationsfeld der Erde und dem elektrischen Feld eines Kondensators befindet, eine Gewichtskraft F_G , Auftriebskraft F_A , Stokessche-Reibungskraft F_R und eine elektrische Kraft F_E . Bei großem Plattendurchmesser D ist das elektrische Feld E direkt proportional zur Potentialdifferenz U und kann als homogen im inneren des Kondensators angenommen werden. Es gilt für Tröpfchen mit Radius r_0 im Luft gefüllten Kondensator mit Plattenabstand d :

$$F_G = \frac{4\pi}{3} r_0^3 \cdot \rho_{\text{Öl}} \cdot g \quad (3.1)$$

$$F_A = -\frac{4\pi}{3} r_0^3 \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot g \quad (3.2)$$

$$F_R = -6\pi\eta_{\text{Luft}} \cdot r_0 \cdot v \quad (3.3)$$

$$F_E = q \cdot E = q \cdot \frac{U}{d} \quad (3.4)$$

Dabei ist v die Geschwindigkeit und q die Ladung des Tröpfchens. $\rho_{\text{Öl}}$ und ρ_{Luft} sind die Dichten des verwendeten Öls und der Luft, wobei zur Übersicht noch die Differenz mit $\rho_{\Delta} = \rho_{\text{Öl}} - \rho_{\text{Luft}}$ definiert wird. Durch Ansetzen eines Gleichgewichts bei steigendem bzw. sinkendem Tröpfchen kann der Radius mit

$$r_0 = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\eta_{\text{Luft}} (v_{\text{steig}} + v_{\text{sink}})}{\rho_{\Delta} \cdot g}} \quad (3.5)$$

ermittelt werden. Das Koordinatensystem ist so gewählt, dass die Gewichtskraft in positive Richtung zeigt und $v_{\text{steig}} < 0$ ist die Steig- und $v_{\text{sink}} > 0$ die Sinkgeschwindigkeit. Da die Ausdehnung des Körpers viel größer ist als die mittlere freie Weglänge λ der Gasmoleküle muss die Viskosität der Luft und somit auch der Tröpfchenradius mit

$$\eta_{\text{kor}} = \eta_{\text{Luft}} \left(1 + A \frac{\lambda}{r_0}\right)^{-1} \quad (3.6)$$

$$r_{\text{kor}} = \sqrt{r_0^2 + \frac{A^2 \lambda^2}{4}} - \frac{A \lambda}{2} \quad (3.7)$$

korrigiert werden. Für die Bedingungen im Praktikum darf $A = 1.257$ und $\lambda = (72.0 \pm 2.0) \text{ nm}$ angenommen werden. [1]

Mit Korrektur ergibt sich die Ladung zu

$$q = 3\pi \frac{d}{U} \cdot \eta_{\text{kor}} \cdot r_{\text{kor}} (v_{\text{steig}} - v_{\text{sink}}) \quad (3.8)$$

und ohne Korrektur

$$q = \frac{9\pi}{2} \frac{d}{U} \sqrt{\frac{\eta_{\text{Luft}}^3 (v_{\text{steig}} + v_{\text{sink}})}{\rho_{\Delta} \cdot g}} (v_{\text{steig}} - v_{\text{sink}}) \quad (3.9)$$

3.2. Experimentelles Vorgehen

Der Aufbau ist der Anleitung [1] zu entnehmen. Mit Hilfe eines Zerstäubers werden Öltröpfchen in den Kondensator eingesprüht und elektrisch aufgeladen. Im Anschluss wird eine Spannung an den Kondensator angelegt und die Bewegung einzelner analysiert. Durch Umpolen ändert sich die Bewegungsrichtung, wenn die Feldstärke groß genug ist. Zur Beobachtung dient ein Mikroskop, dessen Bild um $V = 2.00 \pm 0.05$ vergrößert am Computer sichtbar ist. Mit einem Programm können Hilfslinien erzeugt werden und so eine Distanz l gewählt werden, indem die Steig- bzw. Sinkbewegung beobachtet wird. Mittels zwei Stoppuhren können die dafür benötigten Zeiten t_{steig} und t_{sink} gemessen werden. Diese Prozedur wird mehrmals wiederholt um eine größere Anzahl an Messwerten zu erhalten und im Anschluss tauschen die drei Versuchsgruppen die Daten untereinander aus.

Der Plattenkondensator besitzt einen Durchmesser von $D = 80$ mm und einen Plattenabstand $d = (6.00 \pm 0.05)$ mm, was die Annahme eines homogenen Feldes rechtfertigt.

3.3. Ergebnisse und Diskussion

Durch Druck- und Temperaturmessung am anderen Ende des Praktikums, weshalb größere systematische Abweichungen eingeplant wurden, konnten bei $p = (0.96 \pm 0.01)$ bar und $T = (26.0 \pm 1.1)^\circ\text{C}$ die Viskosität der Luft zu $\eta_{\text{Luft}} = (18.53 \pm 0.20)$ μPa , die Dichte des Öls zu $\rho_{\text{Öl}} = (870.4 \pm 1.0)$ kg/m^3 und die der Luft zu (1.16 ± 0.10) kg/m^3 nach [1] und [2] durch Linearisierung bestimmt werden. Dabei handelt es sich hier rein um syst. Fehler.

Die Spannung wurde im gesamten Versuch auf $U = (149 \pm 6)$ V eingestellt. Dabei ergibt sich $\Delta U_{\text{syst}} = 2.5\%$ „Messwert“ aus einer geschätzten Genauigkeit des Messgeräts und der statistische Anteil durch die Auflösung 1 V und einem geschätzten pseudo-statistischen Teil von 2 V. Die Distanz zwischen zwei Strichen betrug beobachtet 1 Sktlen $:= 0.725$ mm, wobei statistische Abweichungen diesbezüglich in der Zeitmessung (Reaktionszeit $\Delta t = 0.1$ s) schon mitberücksichtigt werden und systematische vernachlässigbar sind. Dabei muss für die echte Distanz x noch die Vergrößerung berücksichtigt werden und es wurde immer über mehrere Skalenteile gemessen. Die Messwerte und daraus ermittelten, korrigierten Ladungen mit den Formeln (3.5), (3.6), (3.7) und (3.8) sind der Tabelle 3.1 zu entnehmen. Die Unsicherheit der Ladung wurde mit Mathematica berechnet und Fehlerrechnungen sind dem Abschnitt A.2 zu entnehmen.

Tabelle 3.1.: Messwerte des Millikan-Versuches und die daraus berechneten, korrigierten Ladungen der Öltröpfchen

Skalenteile Sktlen	x mm	t_{steig} s	t_{sink} s	q 10^{-19} A s
6	2.18 ± 0.05	52.50 ± 0.10	13.10 ± 0.10	-9.6 ± 1.1
6	2.18 ± 0.05	37.40 ± 0.10	13.50 ± 0.10	-9.1 ± 1.0
6	2.18 ± 0.05	62.60 ± 0.10	9.60 ± 0.10	-15.5 ± 1.8

Skalenteile Sktlen	x mm	t_{steig} s	t_{sink} s	q 10^{-19} A s
6	2.18 ± 0.05	9.60 ± 0.10	6.0 ± 1.0	-29 ± 4
6	2.18 ± 0.05	68.20 ± 0.10	14.10 ± 0.10	-8.6 ± 1.0
6	2.18 ± 0.05	36.20 ± 0.10	14.50 ± 0.10	-8.1 ± 0.9
6	2.18 ± 0.05	31.40 ± 0.10	11.20 ± 0.10	-12.2 ± 1.4
6	2.18 ± 0.05	20.70 ± 0.10	13.10 ± 0.10	-8.2 ± 1.0
6	2.18 ± 0.05	52.10 ± 0.10	17.10 ± 0.10	-6.3 ± 0.7
6	2.18 ± 0.05	33.10 ± 0.10	14.00 ± 0.10	-8.5 ± 1.0
4	1.45 ± 0.04	14.90 ± 0.10	7.10 ± 0.10	-12.8 ± 1.6
4	1.45 ± 0.04	22.50 ± 0.10	11.20 ± 0.10	-6.1 ± 0.7
4	1.45 ± 0.04	15.20 ± 0.10	7.40 ± 0.10	-11.9 ± 1.5
4	1.45 ± 0.04	14.00 ± 0.10	9.10 ± 0.10	-7.5 ± 1.0
4	1.45 ± 0.04	34.50 ± 0.10	5.60 ± 0.10	-19.2 ± 2.4
4	1.45 ± 0.04	21.70 ± 0.10	5.70 ± 0.10	-18.9 ± 2.4
4	1.45 ± 0.04	35.60 ± 0.10	15.80 ± 0.10	-3.6 ± 0.4
4	1.45 ± 0.04	12.30 ± 0.10	8.20 ± 0.10	-8.8 ± 1.2
4	1.45 ± 0.04	16.60 ± 0.10	9.20 ± 0.10	-8.1 ± 1.0
4	1.45 ± 0.04	29.60 ± 0.10	9.50 ± 0.10	-8.4 ± 1.0

Mit den Daten von den drei anderen Gruppen und den zusätzlich erhaltenen ergibt sich die Verteilung in Abbildung 3.1. Dabei wurde angenommen, dass die gewählten Unsicherheiten, Voraussetzungen und Eigenschaften bzgl. der Dichte, Viskosität etc. bei allen identisch sind. Die beobachteten Öltröpfchen in dieser Gruppe zeigen dabei eine Anhäufung um ca. -8 A s , was wohl daran liegt, dass wir oft gleichgroße und -schnelle Tröpfchen analysiert haben.

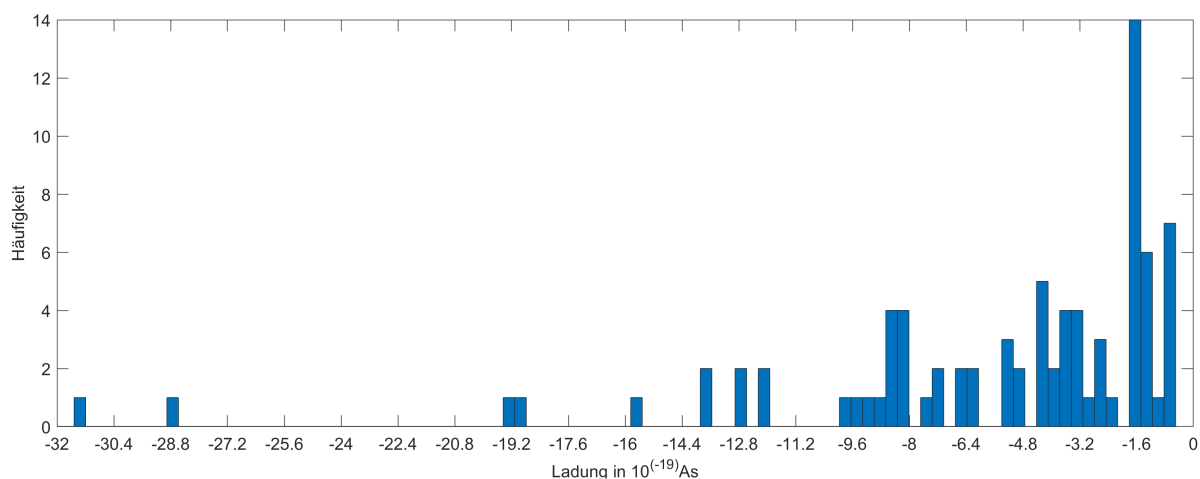


Abbildung 3.1.: Häufigkeitsverteilung der insgesamt 84 Öltröpfchen. Bei Vielfachen der theoretisch erwarteten Elementarladung fällt eine Anhäufung auf, für genauere Analysen ist die Anzahl und Qualität der Messwerte mancher Gruppen jedoch nicht ausreichend.

Auffällig ist ebenfalls der Bereich um ca. -1.6 A s , weshalb dieser nochmals in einem Histogramm 3.2 visualisiert wird. Es lässt sich die Vermutung anstellen, dass die Elementarladung

sich in diesem Intervall befindet und eine gewichtete Mittlung der Ladungen in Abbildung 3.2 führt auf

$$-e = (-1.70 \pm 0.15) \text{ A s}$$

Dabei ergibt sich die statistische Abweichung aus der gewichteten Mittlung und für den systematischen Anteil wurde der Mittelwert dieser verwendet, welcher hier mit ca. 0.14 A s deutlich überwiegt.

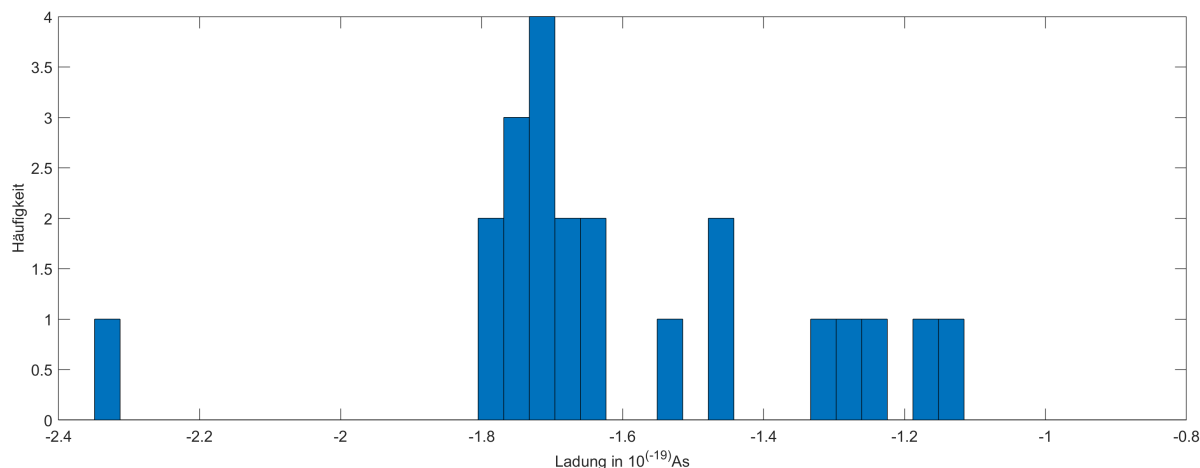


Abbildung 3.2.: Häufigkeitsverteilung der 22 Öltröpfchen im Intervall $[-e/2, e/2]$ um e .

Durch die Vielzahl an Quellen für Ungenauigkeiten ist die Angabe der Ladung nur sehr ungenau möglich. Die größten Unsicherheiten resultierten in der Messung der Spannung und der Distanz. Die statistischen Abweichungen berücksichtigt in der Reaktionszeit konnten bei unseren Daten durch messen der Zeiten über eine große Distanz möglichst gering gehalten werden. Ein Vergleich mit dem Literaturwert $e = 1.602\,176\,620\,8(98) \cdot 10^{-19} \text{ A s}$ zeigt auf, dass die Messung im Toleranzbereich übereinstimmt.

4. Elektronenmasse

Aus den Ergebnissen der zwei Versuche mit jeweiliger Unsicherheit lässt sich nun die Masse eines Elektrons mit

$$m_e = \frac{-e}{-e/m_e} = (9.6 \pm 1.4) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

berechnen. Da keine weitere Messungen statt fanden, kommen keine Unsicherheiten hinzu und es wurde linear fortgepflanzt, was in Abschnitt A.2 begründet wird. Der Vergleich mit der Literatur $m_e = 9.109\,383\,56(11) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ (Tabelle 2.1) fällt positiv aus, jedoch beinhaltet dieses Ergebnis keine zusätzliche Information.

A. Messergebnisse und Fehlerrechnung

Dieses Kapitel beinhaltet Messergebnisse und Fehlerrechnungen. Statistische Unsicherheiten werden immer quadratisch und systematische linear addiert falls dies nicht explizit erwähnt wird.

A.1. Spezifische Elektronenladung

A.1.1. Messreihe 1 bei $I = (1.30 \pm 0.13)$ A

Spannung U

Systematische Unsicherheiten ergeben sich aus der Genauigkeit des Messgerätes von $0.5/0.8\%$ · „Mittelwert“ je nach Messbereich 200/600 V und der statistische Anteil folgt aus der Standardabweichung bei $n = 10$ Messwerten mit $t_{\text{Student}} = 1.06$ je eingestelltem Radius.

Strom I

Die systematische Abweichung ergibt sich aus der Genauigkeit von 2.5% · „Messwert“ im 10 A-Bereich und der statistische Fehler folgt mit der Auflösung von 0.1 A und einem pseudo-statistischen Anteil von 0.01 A.

Messwerte

Tabelle A.1.: Messwerte der Spannungen für die 1. Messreihe bei $I = (1.30 \pm 0.13)$ A mit Mittelwert und Gesamtunsicherheit

r in mm	30	40	50
	U_B V	U_B V	U_B V
	80.7	137.1	214
	80.6	137.5	214
	80.5	136.8	213
	80.7	137.5	213
	80.7	138.0	213
	80.9	136.2	213
	80.9	137.1	212
	81.0	137.6	214
	80.7	138.4	213
	80.9	136.1	214
Mittelwert mit Unsicherheit:	(80.8 ± 0.5) V	(137.2 ± 0.9) V	(213.3 ± 1.9) V

Fehlerfortpflanzung

Für den Fehler des Ladungs-Masse-Verhältnisses wird linear bzw. quadratisch nach Gleichung (2.5) fortgepflanzt und im Anschluss werden die Fehler addiert:

$$\Delta\left(-\frac{e}{m}\right) = \left|-\frac{e}{m}\right| \cdot \left(2\frac{\Delta R}{R} + 2 \cdot \frac{\Delta I_{\text{syst}}}{I} + \frac{\Delta U_{\text{B,syst}}}{U_{\text{B}}} + 2\frac{\Delta r}{r} + \sqrt{\left(2\frac{\Delta I_{\text{stat}}}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{\text{B,stat}}}{U_{\text{B}}}\right)^2}\right)$$

A.1.2 Messreihe 2 bei $U_{\text{B}} = (119.9 \pm 0.8) \text{ V}$

Die Fehlerfortpflanzung auf $-e/m_{\text{e}}$ erfolgt analog zur 1. Messreihe.

Spannung U

Die systematische Abweichung ergibt sich aus der Genauigkeit von 0.5/0.8 % · „Messwert“ im 200/600 V-Bereich und der statistische Fehler folgt mit der Auflösung von 0.1 V und einem pseudo-statistischen Anteil von 0.2 V.

Strom I

Der systematische Fehler ergibt sich aus der Genauigkeit von 2.5 % · „Mittelwert“ im 10 A-Bereich und der statistische folgt aus der Standardabweichung bei $n = 10$ Messungen mit $t_{\text{Student}} = 1.06$.

Messwerte

Tabelle A.2.: Messwerte der Ströme für die 2. Messreihe bei $U_{\text{B}} = (119.9 \pm 0.8) \text{ V}$ mit Mittelwert und Gesamtunsicherheit

r in mm	30	40	50
	I	I	
	A	A	A
	1.62	1.13	0.94
	1.61	1.13	0.94
	1.61	1.12	0.95
	1.61	1.11	0.95
	1.62	1.12	0.94
	1.62	1.11	0.95
	1.62	1.10	0.95
	1.60	1.11	0.95
	1.62	1.11	0.95
	1.60	1.11	0.95
Mittelwert mit Unsicherheit:	$(1.61 \pm 0.04) \text{ V}$	$(1.12 \pm 0.03) \text{ V}$	$(0.947 \pm 0.025) \text{ V}$

A.2. Millikan-Versuch und Elektronenmasse

Fehlerrechnung

Aus den in Kapitel 3 genannten Abweichungen ergibt sich mit

$$v_{\text{sink}} = \frac{t_{\text{sink}}}{x} \quad v_{\text{steig}} = -\frac{t_{\text{steig}}}{x}$$

und den Gleichungen (3.5), (3.6), (3.7) und (3.8) mit Hilfe von Mathematica die Abweichung der korrigierten Ladung nach

$$\Delta q_{\text{syst}} = \left| \Delta d \frac{\partial q}{\partial d} \right| + \left| \Delta x \frac{\partial q}{\partial x} \right| + \left| \Delta \eta_{\text{Luft}} \frac{\partial q}{\partial \eta_{\text{Luft}}} \right| + \left| \Delta \lambda \frac{\partial q}{\partial \lambda} \right| + \left| \Delta \rho_{\Delta} \frac{\partial q}{\partial \rho_{\Delta}} \right| + \left| \Delta U_{\text{syst}} \frac{\partial q}{\partial U} \right|$$

$$\Delta q_{\text{stat}} = \sqrt{\left(\Delta U_{\text{stat}} \frac{\partial q}{\partial U} \right)^2 + \left(\Delta t_{\text{sink}} \frac{\partial q}{\partial t_{\text{sink}}} \right)^2 + \left(\Delta t_{\text{steig}} \frac{\partial q}{\partial t_{\text{steig}}} \right)^2}$$

$$\Delta q = \Delta q_{\text{syst}} + \Delta q_{\text{stat}}$$

Für die Fehlerfortpflanzung auf die Elektronenmasse wurde linear fortgepflanzt, da statistische und systematische Unsicherheiten aus der Bestimmung der spezifischen Elektronenladung in Kapitel 2 durch gewichtete Mittlung zusammengefasst wurden. Mit $q = -e$ folgt

$$\Delta m_e = m_e \left(\left| \frac{\Delta q}{q} \right| + \left| \frac{\Delta q/m_e}{q/m_e} \right| \right)$$

Messwerte anderer Gruppen und dem zusätzlichem Blatt

Bei den nachfolgenden Daten wurden die selben Unsicher- und Gegebenheiten angenommen, wie diese die in unserem Versuch vorlagen. Für die Richtigkeit der Messwerte wird hier nicht Garantiert, sondern auf die jeweilige Ausarbeitung verwiesen.

Tabelle A.3.: Messwerte des Zusatzblattes und die daraus berechneten, korrigierten Ladungen der Öltröpfchen

U V	x mm	t_{steig} s	t_{sink} s	q 10^{-19} A s
503	2.100 ± 0.021	46.90 ± 0.10	17.30 ± 0.10	-1.71 ± 0.14
505	2.100 ± 0.021	47.00 ± 0.10	17.30 ± 0.10	-1.71 ± 0.14
100	1.500 ± 0.015	23.50 ± 0.10	12.30 ± 0.10	-8.2 ± 0.8
505	2.100 ± 0.021	40.20 ± 0.10	16.90 ± 0.10	-1.7 ± 1.5
253	2.100 ± 0.021	40.70 ± 0.10	16.90 ± 0.10	-3.5 ± 0.3
502	2.100 ± 0.021	45.00 ± 0.10	16.80 ± 0.10	-1.80 ± 0.15
503	2.100 ± 0.021	42.30 ± 0.10	16.80 ± 0.10	-1.78 ± 0.15
519	2.100 ± 0.021	42.30 ± 0.10	16.70 ± 0.10	-1.75 ± 0.15
477	2.000 ± 0.020	24.90 ± 0.10	15.90 ± 0.10	-1.63 ± 0.15
506	2.100 ± 0.021	35.70 ± 0.10	16.60 ± 0.10	-1.76 ± 0.15
476	2.000 ± 0.020	25.50 ± 0.10	15.70 ± 0.10	-1.71 ± 0.15
175	1.500 ± 0.015	21.00 ± 0.10	11.70 ± 0.10	-4.9 ± 0.5

U V	x mm	t_{steig} s	t_{sink} s	q 10^{-19} A s
175	1.500 ± 0.015	21.50 ± 0.10	11.60 ± 0.10	-5.1 ± 0.5
123	1.500 ± 0.015	18.50 ± 0.10	11.30 ± 0.10	-7.1 ± 0.7
632	1.500 ± 0.015	17.30 ± 0.10	10.10 ± 0.10	-1.70 ± 0.16
298	2.000 ± 0.020	19.90 ± 0.10	13.00 ± 0.10	-3.6 ± 0.3
343	2.100 ± 0.021	22.40 ± 0.10	13.60 ± 0.10	-3.3 ± 0.3
343	2.100 ± 0.021	23.80 ± 0.10	13.40 ± 0.10	-3.5 ± 0.3
365	2.100 ± 0.021	23.40 ± 0.10	10.30 ± 0.10	-5.3 ± 0.5
396	2.100 ± 0.021	56.00 ± 0.10	9.90 ± 0.10	-5.3 ± 0.5
400	1.500 ± 0.015	31.00 ± 0.10	6.10 ± 0.10	-6.6 ± 0.6
199	1.500 ± 0.015	17.00 ± 0.10	6.00 ± 0.10	-13.7 ± 1.4

Tabelle A.4.: Messwerte vom Team 10 und die daraus berechneten, korrigierten Ladungen der Öltröpfchen. Durchgeführt bei konstanter Spannung $U = (300 \pm 10) \text{ V}$ und Distanz $x = (0.300 \pm 0.008) \text{ mm}$

t_{steig} s	t_{sink} s	q 10^{-19} A s
3.40 ± 0.10	2.20 ± 0.10	-2.9 ± 0.6
8.70 ± 0.10	1.90 ± 0.10	-4.4 ± 0.8
9.30 ± 0.10	2.30 ± 0.10	-3.3 ± 0.5
2.30 ± 0.10	1.20 ± 0.10	-8.6 ± 2.2
3.00 ± 0.10	2.20 ± 0.10	-2.6 ± 0.6
1.00 ± 0.10	0.90 ± 0.10	-7 ± 7
9.60 ± 0.10	3.50 ± 0.10	-1.6 ± 0.2
1.80 ± 0.10	0.90 ± 0.10	-14 ± 4
14.90 ± 0.10	3.80 ± 0.10	-1.46 ± 0.21
3.50 ± 0.10	2.10 ± 0.10	-3.3 ± 0.7
3.00 ± 0.10	1.80 ± 0.10	-4.2 ± 0.9
0.80 ± 0.10	0.50 ± 0.10	-31 ± 16
3.80 ± 0.10	2.50 ± 0.10	-2.3 ± 0.5
3.00 ± 0.10	1.80 ± 0.10	-4.2 ± 0.9
1.50 ± 0.10	0.90 ± 0.10	-13 ± 4
3.00 ± 0.10	1.80 ± 0.10	-4.2 ± 0.9
3.00 ± 0.10	2.00 ± 0.10	-3.3 ± 0.8
2.80 ± 0.10	1.60 ± 0.10	-5.2 ± 1.2
8.50 ± 0.10	3.70 ± 0.10	-1.47 ± 0.22
7.70 ± 0.10	3.90 ± 0.10	-1.30 ± 0.20
1.20 ± 0.10	1.00 ± 0.10	-7 ± 4
0.90 ± 0.10	0.50 ± 0.10	-33 ± 16

Tabelle A.5.: Messwerte vom Team 12 und die daraus berechneten, korrigierten Ladungen der Öltröpfchen. Durchgeführt bei konstanter Distanz $x = (0.300 \pm 0.008)$ mm

U V	t_{steig} s	t_{sink} s	q 10^{-19} A s
188 ± 7	26.57 ± 0.10	4.56 ± 0.10	-1.73 ± 0.23
254 ± 9	24.99 ± 0.10	4.08 ± 0.10	-1.53 ± 0.21
359 ± 11	19.35 ± 0.10	6.10 ± 0.10	-0.56 ± 0.07
206 ± 7	12.73 ± 0.10	2.45 ± 0.10	-4.3 ± 0.7
178 ± 7	9.89 ± 0.10	2.83 ± 0.10	-3.9 ± 0.6
344 ± 10	8.91 ± 0.10	3.76 ± 0.10	-1.13 ± 0.18
444 ± 13	20.17 ± 0.10	5.77 ± 0.10	-0.50 ± 0.06
204 ± 7	4.90 ± 0.10	2.55 ± 0.10	-3.8 ± 0.7
271 ± 9	12.85 ± 0.10	3.70 ± 0.10	-1.68 ± 0.24
251 ± 9	15.17 ± 0.10	7.41 ± 0.10	-0.54 ± 0.07
376 ± 12	5.41 ± 0.10	3.43 ± 0.10	-1.14 ± 0.20
372 ± 12	12.43 ± 0.10	5.68 ± 0.10	-0.58 ± 0.08
408 ± 12	10.67 ± 0.10	5.69 ± 0.10	-0.50 ± 0.07
399 ± 12	8.63 ± 0.10	5.22 ± 0.10	-0.55 ± 0.08
399 ± 12	2.31 ± 0.10	2.06 ± 0.10	-1.3 ± 0.7
219 ± 8	4.06 ± 0.10	2.83 ± 0.10	-2.5 ± 0.5
412 ± 13	12.41 ± 0.10	5.53 ± 0.10	-0.55 ± 0.07
181 ± 7	9.49 ± 0.10	1.56 ± 0.10	-9.9 ± 1.9
198 ± 7	11.56 ± 0.10	5.38 ± 0.10	-1.19 ± 0.17
358 ± 11	3.88 ± 0.10	2.17 ± 0.10	-2.7 ± 0.5

B. Literaturverzeichnis

- [1] *Eigenschaften des Elektrons (ELE)*. 2016. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap2/ELE.pdf> (besucht am 13. August 2018) (siehe S. 2–5).
- [2] Universität Magdeburg. *Stoffwerte*. 2018. URL: <http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Arbeitsheft/IV.pdf> (besucht am 14. August 2018) (siehe S. 5).
- [3] CODATA. *Fundamentale Naturkonstanten*. 1994. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html> (besucht am 13. August 2018) (siehe S. 2).