

VERSUCH 503

Der Millikan-Öltröpfchenversuch

Annika Bennemann
annika.bennemann@tu-dortmund.de

Paulin Vehling
paulin.vehling@tu-dortmund.de

Durchführung: 07.06.2022

Abgabe: 14.06.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Aufbau und Durchführung	4
4 Auswertung	5
5 Diskussion	13
6 Anhang	15
Literatur	17

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuch ist es die Elementarladung mithilfe des Millikan-Öltröpfchenversuchs zu bestimmen.

2 Theorie

Bei dem Millikan-Öltröpfchenversuch werden Öltröpfchen durchs Zerstäuben in das vertikale elektrische Feld eines Plattenkondensators gebracht. Die Tröpfchen werden aufgrund der Reibung elektrisch geladen, wobei diese Ladung ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung ist. Es wirkt die Gravitationskraft $\vec{F}_g = m\vec{g}$, die Reibungskraft $\vec{F}_r = -6\pi r\eta_L v_0$ und die elektrische Kraft $\vec{F}_{el} = q\vec{E}$. Die Geschwindigkeit der Tröpfchen ist abhängig von den Richtungen der Kräfte, was in Abbildung 1 dargestellt wird.

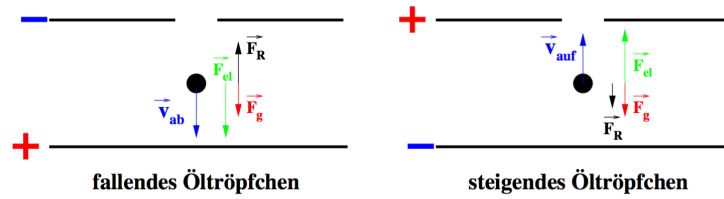


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kräfte in einem homogenen elektrischen Feld[4, S. 1].

Liegt eine Spannung an der unteren Platte an, wirkt die elektrische Kraft in Richtung der Gravitationskraft. Die Reibungskraft wirkt entgegen der beiden Kräfte und gegen die Geschwindigkeit \vec{v}_{ab} . Es gilt die Kräftegleichung

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{Oel} - \rho_L)g - 6\pi\eta_L v_{ab} = -qE. \quad (1)$$

Liegt eine Spannung an der oberen Platte an, wirkt die elektrische Kraft entgegen der Gravitationskraft. Bei hinreichend hoher Feldstärke entsteht eine Aufwärtsbewegung, welche entgegen der Reibungskraft wirkt. Es gilt die Kräftegleichung

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{Oel} - \rho_L)g + 6\pi\eta_L v_{auf} = qE. \quad (2)$$

Die Ladung kann mit Gleichung 1 und Gleichung 2 zu

$$q = 3\pi\eta_L \sqrt{\frac{9}{4} \frac{\eta_L}{g} \frac{(v_{ab} - v_{auf})}{(\rho_{Oel} - \rho_L)} \frac{(v_{ab} + v_{auf})}{E}} \quad (3)$$

bestimmt werden und der Radius zu

$$r = \sqrt{\frac{9\eta_L(v_{ab} - v_{auf})}{2g(\rho_{Oel} - \rho_L)}}. \quad (4)$$

Die Viskosität von Luft muss durch

$$\eta_{eff} = \eta_L \left(\frac{r}{r + A} \right) = \eta_L \left(\frac{\rho r}{\rho r + B} \right) \quad (5)$$

korrigiert werden, weil das Gesetz von Stokes nur gilt, wenn die Abmessung des Tröpfchens größer als die mittlere freie Weglänge ist. Diese Korrektur wird auch als Cunningham-Korrektur bezeichnet, wobei $B = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ gilt. Die Ladung wird mit

$$q^{\frac{2}{3}} = q_0^{\frac{2}{3}} \left(1 + \frac{B}{pr} \right) \quad (6)$$

korrigiert, wobei p der Luftdruck ist.

3 Aufbau und Durchführung

In einem ungeladenen, vertikal ausgerichteten Plattenkondensator wird Öl fein zerstäubt. Die entstandenen Öltröpfchen werden mit einer Halogenlampe angestrahlt, damit dessen Bewegungen unter einem Mikroskop besser verfolgt werden können. Die angelegte Spannung und auch der Widerstand können mit einem Multimeter gemessen werden. Das elektrische Feld kann mit einem Hebel umgepolt werden. Die Temperatur wird mit dem gemessenen Widerstand und einer Thermistor-Widerstandstabelle bestimmt. Aus Abbildung 3 kann so die Viskosität von Luft bestimmt werden.

Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

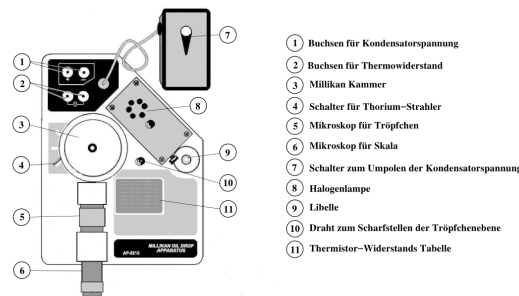


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Millikan-Versuchs[4, S. 3].

Wie in Abschnitt 2 beschrieben werden die Öltröpfchen teilweise durch das Zerstäuben elektrisch geladen. Ist ein messbares Tröpfchen vorhanden, wird die Zeit gemessen, die das Tröpfchen benötigt eine zuvor gewählte Strecke zu durchlaufen. Es wird einmal t_0 gemessen, wo das Teilchen ohne Einfluss des elektrischen Feldes fällt. Anschließend wird für das Tröpfchen drei mal die Steigzeit t_{auf} , bei angelegtem positiven Feld und drei mal die Fallzeit t_{ab} , bei angelegtem negativen Feld gemessen. Die Zeiten werden in eine Tabelle eingetragen.

Die Messung wird für fünf Tröpfchen bei fünf verschiedenen Spannungen durchgeführt.

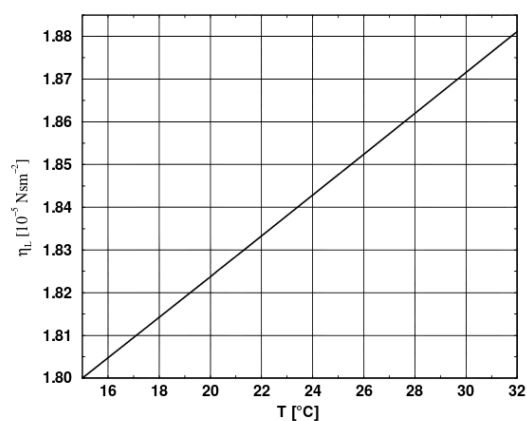


Abbildung 3: Viskosität von Luft in Abhängigkeit von der Temperatur[4, S. 5].

4 Auswertung

Die Messung wird nach Abschnitt 3 durchgeführt. Die Messwerte werden in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Messwerte des Millikan-Versuchs.

U/V	$R/M\Omega$	t_0/s	t_{auf}/s	t_{ab}/s
243,4	2,023	11,12	2.75 3.43	4.78
Mittelwert			3.09 ± 0.34	4.78
243,4	2,023	27,76	13.22 12.36 13.62 12.24	5.43 5.44 5.14 5.92
Mittelwert			12.86 ± 0.33	5.48 ± 0.16
242,4	1,992	16,60	5.45 5.67 5.71	3.76 3.58 3.41
Mittelwert			5.61 ± 0.08	3.58 ± 0.10
242,3	1,990	22,24	4.65 5.49 3.69	4.43 4.17 3.90
Mittelwert			4.61 ± 0.52	4.17 ± 0.15
242,2	1,986	23,82	5.32	4.23

Tabelle 1: (fortgesetzt)

U/V	$R/M\Omega$	t_0/s	t_{auf}/s	t_{ab}/s
			5.85	4.24
			6.37	4.13
Mittelwert			5.85 ± 0.30	4.13 ± 0.06
199,3	1,980	21,82	5.20	3.47
			5.89	3.53
			5.86	3.94
Mittelwert			5.65 ± 0.23	3.65 ± 0.15
199,3	1,975	15,08	12.27	5.22
			11.68	5.04
			11.11	5.53
Mittelwert			11.69 ± 0.33	5.26 ± 0.14
199,2	1,970	32,49	4.81	4.07
			5.87	4.19
			4.80	3.62
Mittelwert			5.16 ± 0.36	3.96 ± 0.17
199,2	1,967	28,20	1.90	0.79
			1.74	1.98
			1.79	2.39
Mittelwert			1.81 ± 0.05	1.72 ± 0.48
199,2	1,965	22,83	2.37	2.63
			2.74	2.39
			2.60	2.43
Mittelwert			2.57 ± 0.11	2.48 ± 0.07
221,4	1,958	17,12	15.08	5.17
			14.53	5.23
			14.27	5.49
Mittelwert			14.63 ± 0.24	5.30 ± 0.10
221,2	1,951	9,55	6.95	3.05
			6.32	2.93
			6.90	3.23
Mittelwert			6.72 ± 0.20	3.07 ± 0.09
221,0	1,952	11,41	11.21	8.18
			11.28	8.64
			10.33	7.43

Tabelle 1: (fortgesetzt)

U/V	$R/M\Omega$	t_0/s	t_{auf}/s	t_{ab}/s
Mittelwert			10.94 ± 0.31	8.08 ± 0.35
221,0	1,950	22,51	6.95	4.23
			6.50	4.66
			6.87	4.55
Mittelwert			6.77 ± 0.14	4.48 ± 0.13
220,9	1,949	26,48	4.55	2.95
			4.54	3.04
			4.70	3.14
Mittelwert			4.60 ± 0.05	3.04 ± 0.05
211,6	1,948	14,08	2.77	2.08
			3.05	2.30
			3.11	2.29
Mittelwert			2.98 ± 0.10	2.22 ± 0.07
211,6	1,947	25,20	2.42	2.03
			2.61	2.01
			2.32	1.99
Mittelwert			2.45 ± 0.09	2.01 ± 0.01
211,6	1,947	20,00	3.04	2.56
			3.26	2.68
			3.54	2.82
Mittelwert			3.28 ± 0.14	2.69 ± 0.08
211,4	1,939	13,95	8.28	3.73
			9.10	3.66
			8.10	4.03
Mittelwert			8.49 ± 0.31	3.81 ± 0.11
211,4	1,937	27,78	6.15	4.23
			6.98	4.36
			7.07	4.10
Mittelwert			6.73 ± 0.29	4.23 ± 0.08
230,4	1,934	30,52	1.76	1.39
			1.90	1.52
			1.55	1.78
Mittelwert			1.74 ± 0.10	1.56 ± 0.11

Tabelle 1: (fortgesetzt)

U/V	$R/M\Omega$	t_0/s	t_{auf}/s	t_{ab}/s
230,4	1,932	24,72	17.84	10.23
			21.19	9.17
			23.73	9.55
Mittelwert			20.92 ± 1.71	9.65 ± 0.31
230,3	1,930	7,55	12.20	3.18
			11.69	3.46
			11.18	3.12
Mittelwert			11.69 ± 0.29	3.25 ± 0.10
230,2	1,930	7,86	9.05	2.65
			8.25	3.03
			9.23	2.99
Mittelwert			8.84 ± 0.30	2.89 ± 0.12
230,1	1,930	26,74	8.35	5.43
			10.15	5.79
			8.94	5.22
Mittelwert			9.15 ± 0.53	5.48 ± 0.17

t_0 , t_{auf} und t_{ab} bezeichnen jeweils die Zeit in der das gewählte Öltröpfchen eine Strecke von 0,5 mm zurücklegt. Aus den Messwerten wird pro Tröpfchen der Mittelwert berechnet und zu Tabelle 1 hinzugefügt. Die Geschwindigkeiten werden außerdem berechnet und in Tabelle 2 eingetragen. Für die weitere Auswertung werden nur die Tröpfchen beachtet, welche ihre Ladung während der Beobachtung nicht geändert haben. Diese erfüllen im Rahmen der Messgenauigkeit die Bedingung

$$0.75 \leq \frac{2 \cdot v_0}{v_{ab} - v_{auf}} \leq 1.25$$

und sind in Tabelle 2 grün markiert.

Tabelle 2: Berechnete Geschwindigkeiten.

U/V	$R/M\Omega$	$v_0/\frac{mm}{s}$	$v_{auf}/\frac{mm}{s}$	$v_{ab}/\frac{mm}{s}$	$\frac{2v_0}{v_{ab}-v_{auf}}$
243,4	2,023	0,045	0.162 ± 0.018	0.105 ± 0.000	-1.572 ± 0.489
243,4	2,023	0,018	0.039 ± 0.001	0.091 ± 0.003	0.688 ± 0.037
242,4	1,992	0,031	0.089 ± 0.001	0.140 ± 0.004	1.192 ± 0.097
242,3	1,990	0,022	0.108 ± 0.012	0.120 ± 0.004	3.929 ± 4.454
242,2	1,986	0,021	0.085 ± 0.004	0.121 ± 0.002	1.179 ± 0.156
199,3	1,980	0,023	0.088 ± 0.004	0.137 ± 0.006	0.945 ± 0.130
199,3	1,975	0,033	0.043 ± 0.001	0.095 ± 0.003	1.268 ± 0.068
199,2	1,970	0,015	0.097 ± 0.007	0.126 ± 0.005	1.048 ± 0.309
199,2	1,967	0,018	0.276 ± 0.008	0.291 ± 0.081	2.453 ± 13.83
199,2	1,965	0,022	0.195 ± 0.008	0.202 ± 0.006	6.204 ± 8.862
221,4	1,958	0,023	0.034 ± 0.001	0.094 ± 0.002	0.971 ± 0.030
221,2	1,951	0,052	0.074 ± 0.002	0.163 ± 0.005	1.184 ± 0.070
221,0	1,952	0,044	0.046 ± 0.001	0.062 ± 0.003	5.418 ± 0.997
221,0	1,950	0,022	0.074 ± 0.002	0.112 ± 0.003	1.177 ± 0.112
220,9	1,949	0,019	0.109 ± 0.001	0.164 ± 0.003	0.677 ± 0.036
211,6	1,948	0,036	0.168 ± 0.006	0.225 ± 0.007	1.236 ± 0.195
211,6	1,947	0,020	0.204 ± 0.007	0.249 ± 0.001	0.888 ± 0.151
211,6	1,947	0,025	0.152 ± 0.007	0.186 ± 0.006	1.495 ± 0.382
211,4	1,939	0,036	0.059 ± 0.002	0.131 ± 0.004	0.991 ± 0.060
211,4	1,937	0,018	0.074 ± 0.003	0.118 ± 0.002	0.820 ± 0.073
230,4	1,934	0,016	0.287 ± 0.017	0.321 ± 0.023	0.988 ± 0.834
230,4	1,932	0,020	0.024 ± 0.002	0.052 ± 0.002	1.449 ± 0.133
230,3	1,930	0,067	0.043 ± 0.001	0.154 ± 0.005	1.192 ± 0.052
230,2	1,930	0,064	0.057 ± 0.002	0.173 ± 0.007	1.093 ± 0.070
230,1	1,930	0,019	0.055 ± 0.003	0.091 ± 0.003	1.022 ± 0.119

Um die unkorrigierten Ladungen und die Radien der Öltröpfchen zu berechnen werden Gleichung 3 und Gleichung 4 herangezogen. Dafür muss zuerst die Temperatur im Versuchsaufbau bestimmt werden. Aus der in [4] gegebenen Tabelle wird

$$T = 7.50 \cdot R^2 - 50.97 \cdot R + 97.37$$

als Formel der Temperatur abhängig vom Widerstand durch eine Ausgleichsrechnung extrahiert. Der Plot mit der Ausgleichsfunktion ist in Abbildung 4 dargestellt.

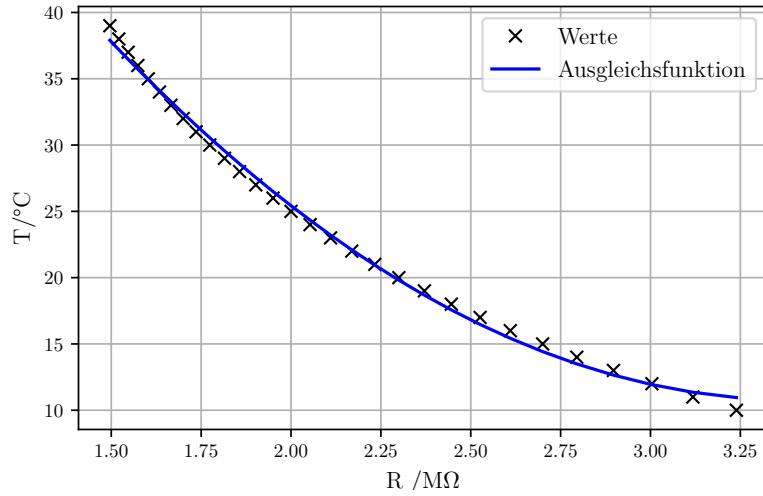


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur.

Nun kann aus Abbildung 3 die Viskosität der Luft für die Temperatur abgelesen werden. Mithilfe des WebplotDigitizers [3] wird die Geradengleichung zu

$$\eta = 0.0048 \cdot T + 1.7268$$

bestimmt. Die berechneten Werte der Temperatur, Viskosität, sowie Ladung und Radius der Öltröpfchen sind in Tabelle 3 aufgelistet. Zudem wird die Viskosität mit der Cunningham-Korrektur angepasst. Somit ändert sich die Formel zur Berechnung der Ladung zu Gleichung 6. Auch die korrigierten Ladungen sind in Tabelle 3 eingetragen. Der Luftdruck wird als $p = 1,013\,25 \text{ bar} = 760 \text{ Torr}$ angenommen. Die Dichte der Öltröpfchen beträgt $\rho_{oel} = 866 \text{ kg/m}^3$ [4] und die Dichte von Luft ist im Verhältnis vernachlässigbar gering. Der Abstand d der Platten des Kondensators beträgt $(7,6250 \pm 0,0051) \text{ mm}$. [4]

Tabelle 3: Berechnete Daten der Öltröpfchen.

$R/\text{M}\Omega$	$T/^{\circ}\text{C}$	$\eta_{Luft}/10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	$r/10^{-6}\text{m}$	$q/10^{-19}\text{C}$	$q_{korrr}/10^{-19}\text{C}$
1,992	25,60	1,8497	$0,70 \pm 0,03$	$6,15 \pm 0,34$	$7,25 \pm 0,40$
1,990	25,64	1,8499	$0,33 \pm 0,19$	$2,90 \pm 1,50$	$4,03 \pm 2,20$
1,986	25,73	1,8503	$0,58 \pm 0,04$	$4,68 \pm 0,24$	$5,70 \pm 0,30$
1,980	25,85	1,8510	$0,68 \pm 0,05$	$6,00 \pm 0,50$	$7,11 \pm 0,60$
1,975	25,96	1,8514	$0,71 \pm 0,02$	$3,79 \pm 0,16$	$4,46 \pm 0,19$
1,970	26,07	1,8519	$0,53 \pm 0,08$	$5,60 \pm 0,80$	$6,93 \pm 1,01$
1,967	26,13	1,8522	$0,40 \pm 1,00$	$0,10 \pm 0,30$	$0,13 \pm 0,40$
1,965	26,17	1,8524	$0,26 \pm 0,19$	$4,90 \pm 3,40$	$7,37 \pm 5,46$
1,958	26,32	1,8532	$0,76 \pm 0,01$	$4,62 \pm 0,13$	$5,38 \pm 0,15$
1,951	26,48	1,8539	$0,92 \pm 0,03$	$0,10 \pm 0,05$	$0,11 \pm 0,06$
1,950	26,50	1,8540	$0,60 \pm 0,03$	$4,75 \pm 0,29$	$5,75 \pm 0,35$
1,948	26,54	1,8542	$0,74 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,11$	$0,14 \pm 0,13$
1,947	26,56	1,8543	$0,65 \pm 0,06$	$0,13 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$
1,947	26,56	1,8543	$0,57 \pm 0,07$	$8,20 \pm 1,00$	$10,01 \pm 1,24$
1,939	26,74	1,8551	$0,83 \pm 0,03$	$6,76 \pm 0,31$	$7,78 \pm 0,36$
1,937	26,78	1,8553	$0,65 \pm 0,03$	$5,57 \pm 0,23$	$6,65 \pm 0,28$
1,934	26,85	1,8557	$0,56 \pm 0,24$	$0,15 \pm 0,07$	$0,18 \pm 0,09$
1,930	26,93	1,8561	$1,03 \pm 0,02$	$9,10 \pm 0,40$	$10,20 \pm 0,45$
1,930	26,93	1,8561	$1,06 \pm 0,03$	$0,11 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$
1,930	26,93	1,8561	$0,59 \pm 0,03$	$3,86 \pm 0,24$	$4,68 \pm 0,29$

Um aus der Ladung die Elementarladung e_0 zu ermitteln werden zunächst die berechneten Ladungen in Abbildung 5 und Abbildung 6 graphisch dargestellt. Es werden horizontale Linien hinzugefügt, sodass möglichst viele der Ladungen auf oder in der Nähe der Linien liegen. Der Abstand der Linien entspricht der berechneten Elementarladung, da die Tröpfchen nur mit einem Vielfachen der Elementarladung geladen sein können. Die Ladungen im Bereich von 0 werden vernachlässigt, da der Abstand zu 0 bei ihnen zu gering ist um die tatsächliche Elementarladung repräsentieren zu können.

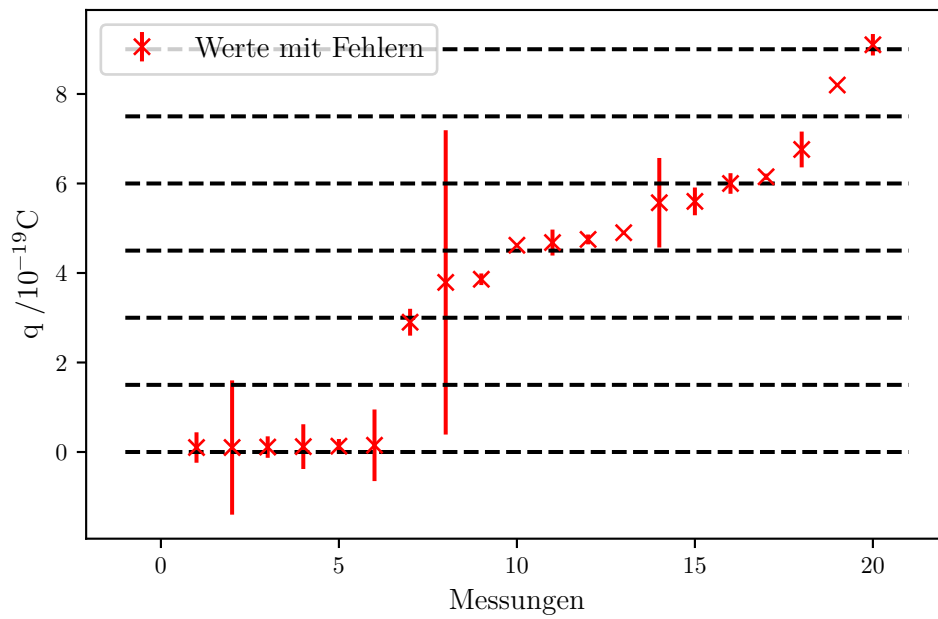


Abbildung 5: Unkorrigierte Ladungen.

Der Abstand zwischen den Linien und somit die bestimmte Elementarladung beträgt bei den unkorrigierten Ladungen

$$e_{0, \text{unkorrigiert}} = 1.5 \cdot 10^{-19} \text{C}.$$

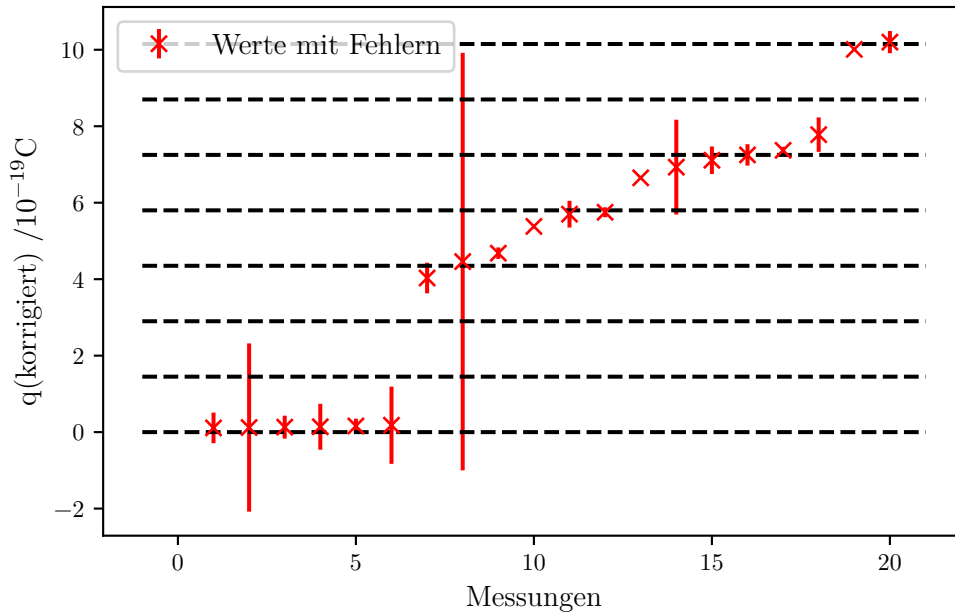


Abbildung 6: Korrigierte Ladungen.

Bei den korrigierten Ladungen beträgt die bestimmte Elementarladung

$$e_{0,korrigiert} = 1.45 \cdot 10^{-19} \text{C}.$$

Durch

$$N_A = \frac{F}{e_0}$$

lässt sich mithilfe der Faraday-Konstante $F = 96\,485,332\,12 \text{ C/mol}$ [2] die Avogadro-Konstante berechnen. Diese lautet demnach für die unkorrigierte und korrigierte Elementarladung

$$N_{A,unkorrigiert} = 6.4324 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}},$$

$$N_{A,korrigiert} = 6.6542 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}.$$

5 Diskussion

Die durch die Messung bestimmten Werte für die Elementarladung werden mit dem Literaturwert [1] verglichen. Zur Berechnung der Abweichung wird die Formel

$$a = \frac{|x - x_{\text{lit}}|}{x_{\text{lit}}} \cdot 100$$

herangezogen.

Die Fehler belaufen sich somit auf

$$\Delta e_{0,unkorrigiert} = 6,37\%,$$

$$\Delta e_{0,korrigiert} = 9,49\%,$$

Die bestimmten Werte liegen in der Größenordnung des Literaturwertes, der Versuch weist jedoch eine hohe Anzahl an möglichen Fehlerquellen auf. Ein Großteil der Unsicherheiten kann mit menschlichem Verhalten bzw. dem manuellen Ablesen der Werte im Versuch erklärt werden. So ist es relativ schwierig durch das Mikroskop einen Tropfen über längere Zeit zu beobachten und seine Position am Raster zu erkennen. Die Zeitmessung erfolgte auch manuell, auch hier wird die Unsicherheit vergrößert. Auch Schwankungen in der angelegten Spannung führen zu Messunsicherheiten. Die errechneten Werte zur Elementarladung können nicht als repräsentativ angenommen werden, da die Abweichung zum Literaturwert nach der Korrektur größer ist als davor, was nicht zu erwarten ist. Jedoch beruht die Bestimmung der Elementarladung nicht auf einer wissenschaftlichen Berechnung sondern es wurden per Augenmaß willkürlich Linien in die Plots hinzugefügt dessen Abstand so angepasst wurde dass möglichst viele Ladungen sich in der Nähe befinden.

6 Anhang

V503 Milikan		pro 0,5mm		
V	Ω	V_0	V_{auf}	V_{ab}
1) 243,4	2,023 M Ω	11,12	2,75 3,43	4,78
2) 243,4	2,023	27,76	13,22 12,36 13,62 12,24	5,42 5,44 5,14 5,92
3) 242,4	1,992	16,60	5,45 5,67 5,71	3,76 3,58 3,41
4) 242,3	1,990	22,24	4,65 5,43 3,63	4,43 4,17 3,90
5) 242,2	1,986	23,82	5,32 5,85 6,37	4,23 4,24 4,13
6) 199,3	1,980	21,82	5,20 5,83 5,86	3,47 3,53 3,94
7) 199,3	1,975	15,08	12,27 11,68 11,11	5,22 5,04 5,53
8) 199,2	1,970	32,45	4,81 5,87 4,80	4,07 4,19 3,62
9) 199,2	1,967	28,20	1,90 1,74 1,73	0,79 1,98 2,33
10) 199,2	1,965	22,83	2,37 2,74 2,60	2,63 2,39 2,43
11) 221,4	1,958	17,12	15,08 14,53 14,27	5,17 5,23 5,49
12) 221,2	1,951	9,55	6,95 6,32 6,90	3,05 2,93 3,23

Abbildung 7: Messwerte zum Versuch.

13)	221,0	1,952	11,41	11,21 11,28 10,33	8,18 8,64 7,43
14)	221,0	1,950	22,51	6,95 6,50 6,87	4,23 4,66 4,55
15)	220,9	1,949	26,48	4,55 4,54 4,70	2,95 3,04 3,14
16)	211,6	1,948	14,08	2,77 3,05 3,11	2,08 2,30 2,25
17)	211,6	1,947	25,20	2,42 2,61 2,32	2,03 2,01 1,99
18)	211,6	1,947	20,00	3,04 3,26 3,54	2,56 2,68 2,82
19)	211,4	1,935	13,95	8,28 9,10 8,10	3,83 3,66 4,03
20)	211,4	1,937	27,78	6,15 6,38 7,07	4,23 4,36 4,10
21)	230,4	1,934	30,52	1,76 1,90 1,55	1,39 1,52 1,78
22)	230,4	1,932	24,72	17,84 21,19 23,73	10,23 9,17 9,55
23)	230,3	1,930	7,55	12,20 11,63 11,18	3,18 3,46 3,12
24)	230,2	1,930	7,86	9,05 8,25 9,23	2,65 3,05 2,99
25)	230,1	1,930	26,74	8,35 10,15 8,94	5,43 5,19 5,22

Abbildung 8: Messwerte zum Versuch.

Literatur

- [1] *Elementary charge*. NIST. 2018. URL: https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e%7Csearch_for=e (besucht am 02.06.2022).
- [2] *Faraday constant*. NIST. 2018. URL: https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?f%7Csearch_for=f (besucht am 09.06.2022).
- [3] Ankit Rohatgi. *Webplotdigitizer: Version 4.5*. 2021. URL: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>.
- [4] *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 503 Der Millikan-Öltröpfchenversuch*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.