

V503

Der Millikan-Öltröpfchenversuch

Umut Aydinli
umut.aydinli@tu-dortmund.de

Muhammed-Sinan Demir
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 03.05.2022

Abgabe: 10.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	5
4 Auswertung	5
5 Diskussion	12
6 Anhang	14
Literatur	16

1 Zielsetzung

In dem Versuch V503 geht es um die experimentelle Bestimmung der Elementarladung e_0 mithilfe einer Millikan-Öltropf-Apparatur.

2 Theorie

Unter der Millikan-Methode wird die Zerstäubung von Öltröpfchen in einem elektrischen Feld, welches durch einen Kondensator entsteht, verstanden, mit welcher die Elementarladung e_0 bestimmt wird. Bei der Zerstäubung laden sich dann die Tröpfchen elektrisch durch Reibung auf, um ganzzahlige Vielfache von e_0 . Ohne ein angelegtes elektrisches Feld wirkt die Gravitationskraft auf das Tröpfchen $\vec{F}_g = m\vec{g}$. Die dabei entgegengerichtete Kraft ist die Stokesche-Reibungskraft, welche durch die Viskosität der Luft ν_L auftritt. Bei einem Gleichgewicht beider Kräfte wird das Tröpfchen nicht weiter beschleunigt

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{\text{Oel}} - \rho_L)g = 6\pi\eta_L r v_0, \quad (1)$$

mit dem Tröpfchenradius r

$$r = \sqrt{\frac{9\eta_L v_0}{2g(\rho_{\text{Oel}} - \rho_L)}}. \quad (2)$$

Beim Anlegen des elektrischen Feldes kommt eine wirkende Kraft hinzu, die elektrostatische Kraft $\vec{F}_{\text{el}} = q\vec{E}$. Diese Kraft wirkt immer in die Richtung des positiven Pols, wie in Abbildung 1 zu sehen.

(3)

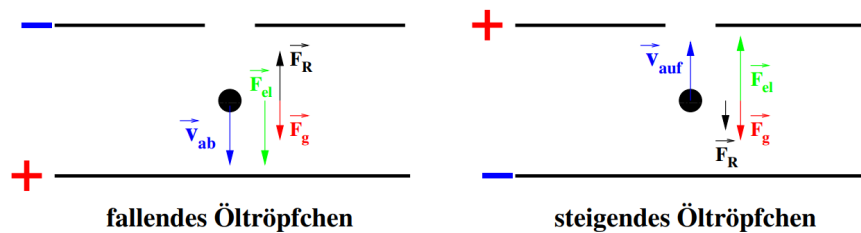


Abbildung 1: Kräftegleichgewicht bei einem Tropfen in einem Plattenkondensator [1].

Wenn die elektrostatische Kraft in die selbe Richtung der Gravitationskraft zeigt, bewegt sich das Öltröpfchen mit einer schnelleren Geschwindigkeit \vec{v}_{ab} als mit der Geschwindigkeit v_0 bei nicht angelegtem Feld. Dafür gilt

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

Wenn die Platten umgepolt werden, sodass die elektrostatische Kraft in die selbe Richtung der Reibungskraft zeigt und die Kraft ausreichend groß genug ist, bewegt sich das Tröpfchen mit der Geschwindigkeit \vec{v}_{auf} nach oben und es gilt

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho_{Oel} - \rho_L)g + 6\pi\eta_L r v_{auf} = +qE. \quad (5)$$

Durch die Gleichungen (4) und (5) lässt sich die Ladung q , die sich auf dem Tröpfchen befindet, mit dem dazugehörigen Tröpfchenradius r bestimmen

$$q = 3\pi\eta_L r \sqrt{\frac{9\eta_L (v_{ab} - v_{auf})}{4g(\rho_{Oel} - \rho_L)}} \cdot \frac{v_{ab} + v_{auf}}{E}, \quad (6)$$

$$r = \sqrt{\frac{9\eta_L (v_{ab} - v_{auf})}{2g(\rho_{Oel} - \rho_L)}}. \quad (7)$$

Mit Hilfe der Gleichung (6) wird $q_{unkorrigiert}$, der Formel (7) der Radius und mit der Formel

$$q = q_0 \left(1 + \frac{B}{pr}\right) \quad (8)$$

wird $q_{korrigiert}$ berechnet.

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

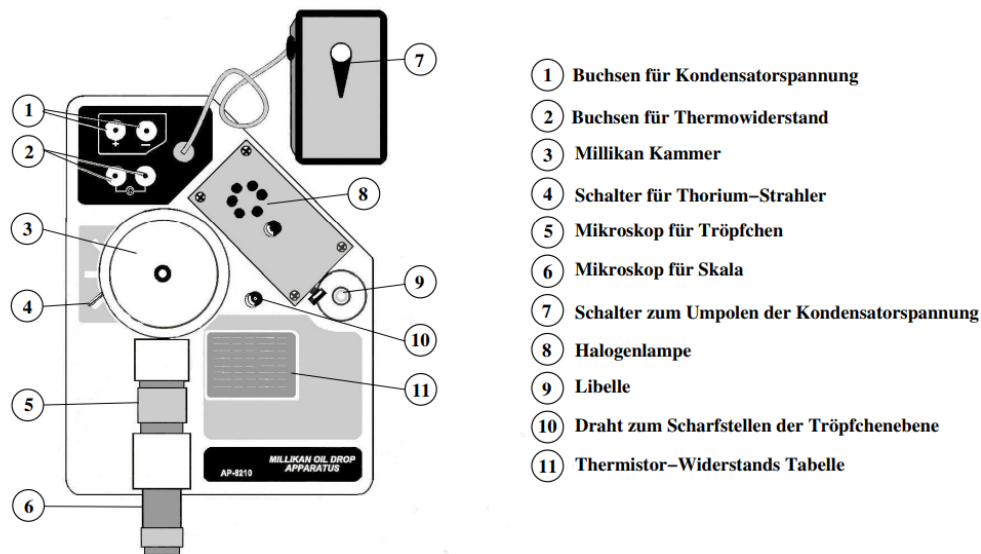


Abbildung 2: Apparatur zum Millikan-Öltröpfchenversuch [1].

Der Versuch wird mit der Apparatur aus Abbildung 2 durchgeführt, welcher mit einer Spannungsquelle verbunden ist. Optional kann vorne an das Mikroskop eine Kamera angebracht werden, welche mit einem Monitor verbunden ist für ein einfacheres Beobachten. Zuerst wird die Spannung auf 0 V gestellt und mit dem Draht das Mikroskop fokussiert, sodass ein klares Bild zu erkennen ist. Dies wird durch stecken der Nadel in das kleine Loch in der Millikan-Kammer und drehen der Regler des Mikroskops erreicht. Als nächstes wird die Zeit t_0 bestimmt, indem zeitlich bestimmt wird wie lange das Teilchen benötigt um von der einen zur nächsten Markierung zu gelangen, durch die Erdanziehungskraft. Danach wird eine Spannung zwischen 190 V bis 250 V gewählt und mit der Ölsprühflasche durch die Öffnung auf der Millikan-Kammer in diese eingesprüht. Auf dem Monitor sind nun die Öltröpfchen zu beobachten und können, falls sie geladen sind, durch das Umstellen des Schalters zum Umpolen der Kondensatorspannung bewegt werden. Dabei wird für das selbe Teilchen vier mal die zeitliche Bewegung aufgenommen, für beide Umpolungen. Dies wird für fünf Teilchen wiederholt für jeweils fünf verschiedene Spannungen.

4 Auswertung

Gemessen wurden die Zeiten t_{ab} , t_{auf} und t_0 . Dafür wurden die Platten umgepolt wie in Abbildung 1. Für die Gleichgewichtslage wurde keine Spannung angebracht. Die Tröpfchen wurden über eine Strecke von $s = 0,5 \cdot 10^{-3}$ m beobachtet. Die Zeiten wurden

tabellarisch in Tabelle 1, Tabelle 2, und Tabelle 3 festgehalten.

Tabelle 1: Gemessene Zeiten (1)

(a) $U = 190 \text{ V}$, $R = 2,27 \text{ M}\Omega$, $T = 20^\circ\text{C}$			(b) $U = 200 \text{ V}$, $R = 2,27 \text{ M}\Omega$, $T = 20^\circ\text{C}$		
t_0 / s	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s	t_0 / s	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
63	2,04	1,94	70,2	2,25	2,26
	1,86	2,27		2,27	2,06
	1,68	1,84		2,38	2,07
	2,04	1,72		2,06	2,45
→	$1,90 \pm 0,17$	$1,94 \pm 0,23$	→	$2,24 \pm 0,11$	$2,21 \pm 0,15$
42,32	5,25	3,82	51,8	2,42	2,44
	4,32	4,18		2,52	2,23
	4,76	4,24		2,52	2,48
	4,70	3,97		2,65	2,47
→	$4,74 \pm 0,33$	$4,05 \pm 0,16$	→	$2,52 \pm 0,08$	$2,40 \pm 0,10$
44,54	6,70	5,51	40,58	3,69	2,91
	6,54	5,03		3,31	3,06
	7,16	5,92		3,71	2,98
	6,37	5,39		3,88	2,97
→	$6,69 \pm 0,29$	$5,46 \pm 0,31$	→	$7,03 \pm 0,42$	$5,32 \pm 0,27$
49,3	7,67	5,34	64,8	3,75	3,29
	6,96	5,75		4,00	3,41
	6,48	4,98		3,78	3,72
	7,02	5,23		3,97	2,47
→	$7,03 \pm 0,42$	$5,32 \pm 0,27$	→	$3,87 \pm 0,25$	$3,47 \pm 0,15$
56,3	5,85	4,37	41,68	2,51	2,09
	5,56	4,74		2,31	1,89
	5,04	4,66		2,30	2,27
	5,32	4,81		2,24	1,85
→	$7,03 \pm 0,42$	$5,32 \pm 0,27$	→	$2,34 \pm 0,10$	$2,02 \pm 0,16$

Tabelle 2: Gemessene Zeiten (2)**(a)** $U = 225 \text{ V}$, $R = 2,27 \text{ M}\Omega$, $T = 20^\circ\text{C}$

t_0 / s	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
66,6	2,18	1,83
	1,70	1,53
	1,76	1,76
	1,87	1,84
→	$1,87 \pm 0,18$	$1,73 \pm 0,12$
49,51	1,84	1,70
	1,94	1,60
	1,86	1,76
	1,80	1,62
→	$1,86 \pm 0,05$	$1,67 \pm 0,06$
63,0	2,31	1,79
	1,98	1,65
	1,79	1,86
	1,82	1,77
→	$1,97 \pm 0,2$	$1,76 \pm 0,07$
59,74	2,40	1,89
	2,16	1,87
	1,97	2,08
	1,90	1,87
→	$2,1 \pm 0,19$	$1,92 \pm 0,08$
58,86	3,22	2,22
	2,94	2,17
	2,60	2,48
	2,47	2,46
→	$2,8 \pm 0,29$	$2,33 \pm 0,13$

(b) $U = 225 \text{ V}$, $R = 2,27 \text{ M}\Omega$, $T = 20^\circ\text{C}$

t_0 / s	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
50,85	2,18	1,54
	1,92	1,91
	1,88	2,17
	1,49	1,76
→	$1,86 \pm 0,24$	$1,84 \pm 0,22$
70,2	2,31	1,55
	1,99	1,92
	2,19	1,93
	2,02	1,77
→	$2,12 \pm 0,13$	$1,79 \pm 0,15$
57,58	2,63	1,98
	2,43	2,22
	2,37	2,19
	2,37	2,31
→	$2,45 \pm 0,10$	$2,17 \pm 0,12$
64,2	3,30	2,83
	4,30	2,77
	3,12	2,99
	2,98	2,93
→	$3,17 \pm 0,13$	$2,88 \pm 0,08$
47,08	2,78	2,19
	2,08	2,17
	2,34	2,16
	2,28	2,02
→	$2,37 \pm 0,25$	$2,13 \pm 0,06$

Tabelle 3: Gemessene Zeiten (3) $U = 250 \text{ V}$, $R = 2,26 \text{ M}\Omega$, $T = 21^\circ\text{C}$

t_0 / s	$t_{\text{auf}} / \text{s}$	t_{ab} / s
50,85	2,18	1,54
	1,92	1,91
	1,88	2,17
	1,49	1,76
→	$1,86 \pm 0,24$	$1,84 \pm 0,22$
70,2	2,31	1,55
	1,99	1,92
	2,19	1,93
	2,02	1,77
→	$2,12 \pm 0,13$	$1,79 \pm 0,15$
57,58	2,63	1,98
	2,43	2,22
	2,37	2,19
	2,37	2,31
→	$2,45 \pm 0,10$	$2,17 \pm 0,12$
64,2	3,30	2,83
	4,30	2,77
	3,12	2,99
	2,98	2,93
→	$3,17 \pm 0,13$	$2,88 \pm 0,08$
47,08	2,78	2,19
	2,08	2,17
	2,34	2,16
	2,28	2,02
→	$2,37 \pm 0,25$	$2,13 \pm 0,06$

Die daraus resultierende Geschwindigkeit berechnet sich über

$$v = \frac{s}{t}. \quad (9)$$

Im Übrigen wird die Berechnung

$$2 \cdot v_0 = v_{\text{ab}} - v_{\text{auf}}$$

überprüft. Dementsprechend werden folgende Ergebnisse verwendet, die in dem Intervall

$$0,75 < \frac{2v_0}{v_{ab} - v_{auf}} < 1,25 \quad (10)$$

liegen. Liegen sie außerhalb des Intervalls, so sind die Ergebnisse nicht im Rahmen der Messungenauigkeit und werden für die folgende Rechnung nicht verwendet. Diese Ergebnisse der Geschwindigkeiten befinden sich in Tabelle 4, sowie die Ergebnisse in Rot, die die Bedingung in der Gleichung (9) nicht erfüllen.

Tabelle 4: Die Geschwindigkeiten.

$v_0 / 10^{-6} \frac{m}{s}$	$v_{auf} / 10^{-4} \frac{m}{s}$	$v_{ab} / \frac{m}{s}$	$\frac{2v_0}{v_{ab} - v_{auf}}$
7,94	$2,63 \pm 0,24$	$2,57 \pm 0,34$	2,64
11,18	$1,05 \pm 0,07$	$1,23 \pm 0,04$	1,24
11,12	$0,74 \pm 0,01$	$0,91 \pm 0,03$	1,30
10,14	$0,71 \pm 0,01$	$0,93 \pm 0,04$	0,92
8,88	$0,91 \pm 0,12$	$1,07 \pm 0,04$	1,10
7,12	$2,23 \pm 0,14$	$2,26 \pm 0,08$	4,74
9,65	$1,98 \pm 0,13$	$2,08 \pm 0,07$	1,93
12,32	$1,37 \pm 0,11$	$1,68 \pm 0,13$	0,79
7,71	$1,29 \pm 0,04$	$1,44 \pm 0,07$	1,02
11,19	$2,13 \pm 0,06$	$2,47 \pm 0,22$	0,65
7,50	$2,67 \pm 0,07$	$2,89 \pm 0,16$	0,68
10,09	$2,68 \pm 0,10$	$2,99 \pm 0,29$	0,65
7,93	$2,53 \pm 0,12$	$2,84 \pm 0,16$	0,51
8,36	$2,38 \pm 0,05$	$2,60 \pm 0,09$	0,76
8,49	$1,78 \pm 0,18$	$2,14 \pm 0,11$	0,47
9,83	$2,68 \pm 0,16$	$2,71 \pm 0,05$	6,50
7,12	$2,35 \pm 0,09$	$2,79 \pm 0,03$	0,32
8,68	$2,04 \pm 0,21$	$2,30 \pm 0,19$	0,66
7,70	$1,57 \pm 0,18$	$1,73 \pm 0,08$	0,96
10,6	$2,10 \pm 0,07$	$2,34 \pm 0,24$	0,88
11,19	$3,54 \pm 0,22$	$3,90 \pm 0,31$	0,62
8,62	$2,99 \pm 0,24$	$3,37 \pm 0,20$	0,45
11,31	$2,04 \pm 0,18$	$2,08 \pm 0,14$	5,65
9,46	$3,60 \pm 0,06$	$3,81 \pm 0,18$	0,90
9,86	$2,52 \pm 0,05$	$2,56 \pm 0,22$	4,93

Die korrigierte Ladung wird mit Hilfe der Formel 8 berechnet. Dabei ist r der Radius und p der Luftdruck. Der Cunningham-Term berechnet sich mit $B = 82,29 \text{ Pa m}$. Die Daten dafür befinden sich in der Tabelle 5. Die Ergebnisse der Ladung werden grafisch in der Abbildung 3 und 4 dargestellt. Die Viskositäten η_L wurden aus der Abbildung 5 entnommen

$$20^\circ\text{C} \rightarrow 1,824 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$21^\circ\text{C} \rightarrow 1,827 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}.$$

Tabelle 5: Ladungen aus den Geschwindigkeiten

No.	$q_{\text{unkorrigiert}} / 10^{-9} \text{ C}$	$r / 10^{-7} \text{ m}$	$q_{\text{unkorrigiert}} / 10^{-9} \text{ C}$
1	$4,32 \pm 0,21$	$2,91 \pm 0,07$	$6,36 \pm 0,03$
2	$4,84 \pm 0,14$	$3,22 \pm 0,14$	$6,12 \pm 0,09$
3	$4,98 \pm 0,32$	$2,75 \pm 0,20$	$7,94 \pm 0,16$
4	$10,15 \pm 0,41$	$3,82 \pm 0,08$	$9,94 \pm 0,30$
5	$6,32 \pm 0,11$	$2,66 \pm 0,07$	$10,65 \pm 0,24$
6	$13,30 \pm 0,21$	$3,22 \pm 0,23$	$16,84 \pm 0,33$
7	$7,01 \pm 0,09$	$2,75 \pm 0,12$	$11,24 \pm 0,29$
8	$11,55 \pm 0,18$	$3,36 \pm 0,09$	$13,72 \pm 0,16$
9	$16,24 \pm 0,30$	$3,15 \pm 0,12$	$21,25 \pm 0,36$

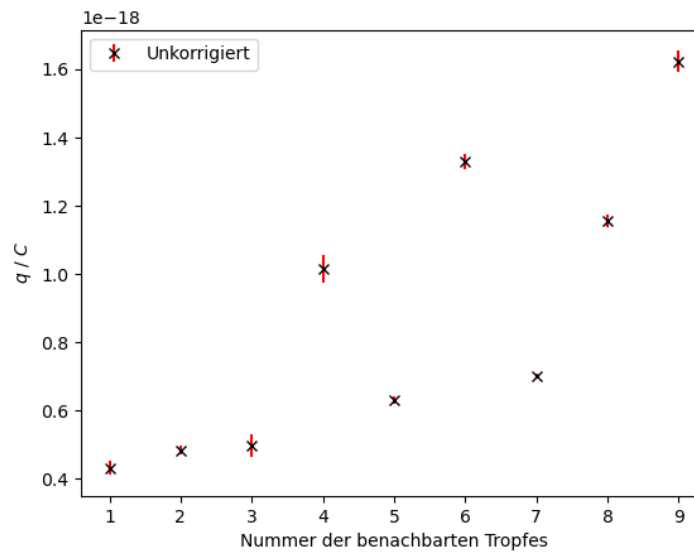


Abbildung 3: Unkorrigierte Ladungen.

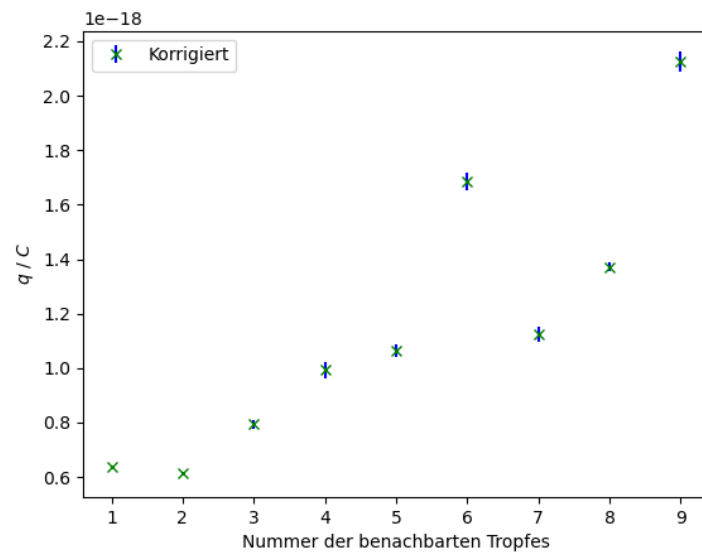


Abbildung 4: Korrigierte Ladungen.

Dementsprechend folgen für die Elementarladungen

$$e_{0,\text{unkorrigiert}} = (1,749 \pm 0,036) \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

$$e_{0,\text{korrigiert}} = (1,651 \pm 0,021) \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

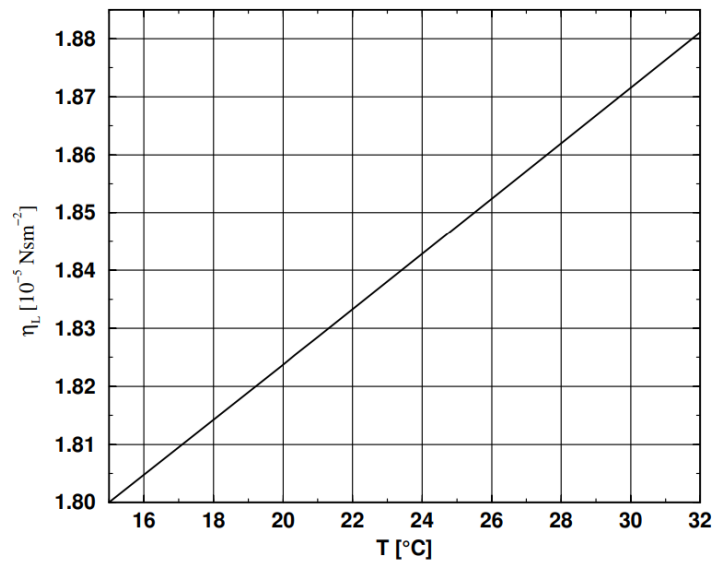


Abbildung 5: Viskosität von Luft als Funktion der Temperatur [1].

Aus den gewonnen Ladungen berechnet sich die Avogradokonstante N_a

$$N_a = \frac{F}{e_0} \quad (11)$$

mit der Faradaykonstante [4] $F = 96,485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$. Daraus folgt mit den beiden Ladungen $q_{\text{unkorrigiert}}$ und $q_{\text{korrigiert}}$:

$$N_{a, \text{unkorrigiert}} = (5,516 \pm 0,113) \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}},$$

$$N_{a, \text{korrigiert}} = (5,844 \pm 0,027) \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}.$$

5 Diskussion

Auffällig bei der Bestimmung der Elementarladung sind folgende Verhältnisse mit dem Literaturwert [3].

Tabelle 6: Abweichung der Ladung.

Abweichung mit $e_{\text{Lit}} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ in %	
$e_{0, \text{unkorrigiert}}$	9,17
$e_{0, \text{korrigiert}}$	3,05

Beide Methoden eignen sich für die Bestimmung der Elementarladung. Die korrigierte Version erweist sich als profitabler, da die Abweichung sehr gering ist. Jedoch ist es anzumerken, dass mehr als die Hälfte der Messungen nicht im vorgenommenen Intervall lagen, die auf mögliche Fehlerquellen hinweisen. Zudem musste das Ablesen, sowie das stoppen der Zeit gleichzeitig passieren, um Messungenauigkeiten zu minimieren. Trotzdem könnten Absetzer entstanden sein, wodurch die Zeiten unpassender geworden sind. Ebenso könnten sich die Ladungen der Tröpfchen während des Prozesses verändert haben. Nichtsdestotrotz liefern die vorhandenen Messdaten akzeptable Ergebnisse. Für die daraus resultierende Avogadrokonstante:

Tabelle 7: Abweichung der Konstanten.

Abweichung mit $N_{a, \text{Lit}} = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$ [2] in %	
$N_{a, \text{unkorrigiert}}$	8,4
$N_{a, \text{korrigiert}}$	2,9

Grundsätzlich eignen sich beide Methoden trotz der vielen Messunsicherheiten.

6 Anhang

V503			$S = 0,5 \text{ mm}$			t_{ab}	t_{auf}	$t_{umtauschen}$
Zeiten								
1) $U = 190$ $\Omega = 2,27$ (Einstellung werden)			2) $U = 200$ $\Omega = 2,27$					
$T =$	t_{ab}/s	t_{auf}/s	$T =$	t_{ab}/s	t_{auf}/s			
1. 1:05,92	2,04 1,86 1,68 2,04	1,94 2,27 1,84 1,72	1. 1:17,91	2,25 2,27 2,38 2,06	2,76 2,06 2,07 2,45			
2. 42,32	5,25 4,32 4,76 4,70	3,82 4,18 4,24 3,97	2. 51,80	2,42 2,52 2,52 2,65	2,44 2,23 2,48 2,47			
3. 44,54	6,70 6,54 6,71 6,37	5,51 5,03 5,92 5,39	3. 40,58	3,69 3,31 3,71 3,88	2,51 3,00 2,98 2,97			
4. 49,30	7,67 6,96 6,48 7,02	5,34 5,75 4,98 5,23	4. 1:08,01	3,75 4,00 3,78 3,97	3,29 3,41 3,72 3,47			
5. 56,30	5,85 5,56 5,04 5,32	4,37 4,74 4,66 4,81	5. 41,68	2,51 2,31 2,30 2,24	2,09 1,89 2,27 1,85			
3) $U = 210$ $\Omega = 2,27$			4) $U = 225$ $\Omega = 2,27$					
$T =$	t_{ab}/s	t_{auf}/s	$T =$	t_{ab}/s	t_{auf}/s			
1. 1:11,62	2,18 1,70 1,76 1,87	1,83 1,53 1,76 1,84	1. 50,85	2,18 1,82 1,88 1,49	1,84 1,91 2,17 1,76			
2. 49,51	1,84 1,94 1,86 1,80	1,70 1,60 1,76 1,62	2. 1:17,98	2,31 1,99 2,19 2,02	1,55 1,92 1,93 1,77			
3. 1:05,60	2,31 1,98 1,79 1,82	1,79 1,65 1,86 1,77	3. 57,58	2,63 2,43 2,57 2,37	1,98 2,22 2,19 2,31			
4. 59,74	2,40 2,16 1,97 1,90	1,89 1,87 2,08 1,87	4. 1:07,28	3,30 3,30 3,12 2,98	2,83 2,77 2,90 2,93			
5. 58,86	3,22 2,94 2,60 2,49	2,22 2,17 2,48 2,46	5. 47,08	2,34 2,28 2,03 2,47	2,78 2,08 2,34 2,28			
$\Rightarrow T =$			$\Rightarrow T =$					

$\Omega = 2,26$ $U = 250V$ $T = 27,8$		
$t_{0/s}$	$t_{ab/s}$	$t_{anf/s}$
1. 41,95	1,47	1,24
	1,47	1,23
	1,41	1,36
	1,30	1,31
		1,37
2. 57,99	1,72	1,56
	1,77	1,46
	1,52	1,53
	1,63	
	2,38	2,08
3. 44,20	2,61	2,34
	2,57	2,45
	2,26	2,75
	1,46	1,25
	1,34	1,32
4. 52,82	1,37	1,45
	1,31	1,25
	1,86	2,01
	2,21	2,02
	1,57	1,85
5. 50,70	1,89	1,54

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Der Millikan-Öltröpfchenversuch*. 2022. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1977190/mod_resource/content/1/V503.pdf (besucht am 09.05.2022).
- [2] Units The NIST Reference on Constants und Uncertainty. *Avogadro constant*. 2022. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?na> (besucht am 09.05.2022).
- [3] Units The NIST Reference on Constants und Uncertainty. *elementary charge*. 2022. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e> (besucht am 09.05.2022).
- [4] Units The NIST Reference on Constants und Uncertainty. *Faraday constant*. 2022. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?f> (besucht am 09.05.2022).